This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

Digitized by Google

Library
of the
University of Wisconsin

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITÉ

THÉORIQUE ET PRATIQUE

DES

PILES ÉLECTRIQUES.

Digitized by Google

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,

QUAI DES AUGUSTINS, 55.

Digitized by Google

TRAITÉ

THÉORIQUE ET PRATIQUE

DES

PILES ÉLECTRIQUES

MESURE DES CONSTANTES DES PILES,

UNITÉS ÉLECTRIQUES,

DESCRIPTION ET USAGE DES DIFFÉRENTES ESPÈCES DE PILES;

PAR A. CAZIN,

DOCTEUR ÈS SCIENCES, PROFESSEUR AU LYCÉE FONTANES;

ANNOTÉ ET PUBLIÉ

Par M. Alfred ANGOT,

AGRÉGÉ DE L'UNIVERSITÉ, DOCTEUR ÈS SCIENCES.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

1881

(Tous droits réservés)

Digitized by Google

Digitized by Google

77526
MAR 23 1904
TNM
.C31
6470280

PRÉFACE.

Le *Traité théorique et pratique des Piles électriques* que nous publions aujourd'hui est le dernier Ouvrage de M. A. Cazin et celui de tous les Livres qu'il a écrits auquel il attachait le plus d'importance.

Malgré l'époque tardive à laquelle il voit le jour, cet Ouvrage avait été commencé à un moment où il n'existait encore aucun Traité analogue; c'est, en effet, dès 1871 que le plan en fut arrêté et que M. Cazin entreprit les recherches bibliographiques indispensables. Les devoirs absorbants du professorat, une longue mission scientifique dans l'hémisphère sud, et enfin les crises de la maladie qui devait l'emporter après deux années de souffrances, furent autant d'obstacles qui retardèrent M. Cazin dans son travail, et c'est seulement quelques semaines avant sa mort qu'il put terminer son manuscrit, sans même avoir le temps de le relire et d'y apporter les derniers remaniements.

Intimement lié depuis douze ans à M. Cazin, comme élève, puis comme ami, je connaissais dès l'origine le plan de l'Ouvrage, et j'avais même pu, à diverses reprises, y contribuer dans une faible partie. Aussi M. Cazin me pria-t-il, à ses derniers moments, de revoir et de compléter son œuvre, et d'en assurer la publication. De son côté, M. Gauthier-Villars, à qui le manuscrit avait été remis, consentit immédiatement à l'éditer, heureux de donner ainsi à un homme qu'il estimait depuis de

Digitized by Google

longues années une dernière preuve de sympathie, que la famille et les amis de M. Cazin ne sauraient oublier.

Pour répondre autant que possible aux désirs de M. Cazin, on s'est borné à revoir le manuscrit, sans y introduire d'autre modification essentielle que l'addition des piles nouvelles proposées dans l'intervalle de la publication. Nous avons la conscience que cet Ouvrage, le plus complet qui existe actuellement sur ce sujet, pourra rendre des services, tant par les matières qu'il contient que par l'indication scrupuleuse des sources auxquelles on a puisé, ce qui permettra de se reporter aisément dans chaque cas aux Mémoires originaux. On trouvera également dans l'Introduction l'exposé simple et à un point de vue tout pratique des différentes questions que soulèvent l'étude des piles, leur emploi et les unités adoptées par les électriciens.

Enfin, comme dans un sujet pareil il est difficile d'arriver à être complet, nous serons heureux que l'on veuille bien nous signaler successivement soit les lacunes, soit les découvertes nouvelles, afin que les éditions suivantes soient tenues au courant des progrès si rapides que fait de nos jours l'électricité.

Mars 1881.

ALFRED ANGOT.

Digitized by Google

TRAITÉ

THÉORIQUE ET PRATIQUE

DES

PILES ÉLECTRIQUES.

INTRODUCTION.

---

§ I. — Préliminaires.

Un corps est électrisé lorsqu'il attire les corps légers, tels que des barbes de plume. Un corps est électrisé *positivement* lorsqu'il repousse une balle de sureau suspendue à un fil de soie, après que cette balle a touché un bâton de verre poli, frotté avec un morceau d'étoffe de laine. Un corps est électrisé *négativement* lorsqu'il attire la même balle de sureau, à condition qu'on se soit assuré auparavant qu'il est électrisé, c'est-à-dire qu'il attire des corps légers.

Certains corps, tels que le verre, la résine, le soufre, peuvent présenter des parties électrisées, sans que les parties voisines le soient. L'électricité se propage dans ces corps avec une lenteur plus ou moins grande : ce sont les *mauvais conducteurs*. D'autres corps, au contraire, tels que les métaux, ne peuvent être électrisés en un point sans que l'électricité se répande très rapidement sur toute leur surface : ce sont les *bons conducteurs*. On est obligé de les soutenir par des corps

Digitized by Google

mauvais conducteurs, ou *isoloirs;* sans cela, ils transmettraient au globe terrestre l'électricité qu'on voudrait leur donner, et aucune trace de cette électricité ne resterait apparente. L'emploi des corps mauvais conducteurs pour isoler les corps qui conduisent bien l'électricité leur fait donner fréquemment le nom de *corps isolants.*

Quand deux corps conducteurs possédant l'un de l'électricité positive, l'autre de l'électricité négative, sont réunis par un fil de métal, l'électricité peut complètement disparaître, ou bien il reste dans le système une des deux électricités. Dans le premier cas, les corps possédaient des *quantités égales* des deux électricités. Dans le second cas, ils possédaient des quantités inégales; la plus petite a complètement disparu, et ce qui reste de la plus grande est, par définition, son excès sur l'autre. On dit alors qu'il y a eu *décharge électrique.* Pendant cette décharge, le fil est le lieu de phénomènes dont le sens peut être inverse quand on intervertit les électricités des deux corps, et l'on dit que le fil est traversé par un *courant électrique* allant du corps électrisé positivement au corps électrisé négativement. Bien que ce langage soit le résultat d'une hypothèse sur la nature de l'électricité, il peut être conservé sans inconvénient comme l'expression symbolique d'un fait.

Une *pile électrique* est un appareil qui reproduit sans cesse des quantités égales de chaque électricité, à mesure qu'elles disparaissent en produisant un courant dans un corps conducteur. En même temps, il s'accomplit dans l'intérieur de la pile une certaine dépense d'énergie. Le plus souvent, c'est l'énergie chimique qui est dépensée; les forces chimiques agissent comme forces motrices pour produire des combinaisons. Mais on peut aussi dépenser d'autres sortes d'énergie, telles que la chaleur ou le travail mécanique : de là les piles *thermo-électriques* et les *machines magnéto-électriques* ou *électro-dynamiques.* Il est vrai que l'on n'a pas l'habitude d'appeler *piles* ces derniers appareils, mais leur but est le même.

Le mot *pile* vient de la forme donnée au premier appareil de ce genre, qui fut inventé par Volta en 1800. Les contemporains

Digitized by Google

de ce grand homme, frappés de l'importance de sa découverte, lui rendirent hommage en appelant *pile voltaïque* tout appareil analogue à celui de Volta, transformant l'énergie chimique en électricité, et *courant voltaïque* l'état du fil dans lequel s'accomplit d'une manière incessante une décharge électrique. La Science a conservé ces expressions, qui immortalisent le précurseur de tant d'inventions merveilleuses.

La pile et le conducteur dans lequel s'opère la décharge forment un *circuit* continu. On dit souvent que la pile est la portion *intérieure* du circuit, et le conducteur en est la portion *extérieure*. Les points de jonction de ces deux parties du circuit sont les *pôles* de la pile; le pôle positif est à l'extrémité où apparaît l'électricité positive; le pôle négatif est à l'autre. Les mots *rhéophores*, *électrodes*, sont employés pour désigner les parties extérieures du circuit.

La pile est souvent formée d'une série d'*éléments* semblables juxtaposés. Chacun de ces éléments est lui-même une pile ayant ses deux pôles. Quand on rassemble plusieurs éléments de façon qu'un conducteur réunisse le pôle positif d'un élément au pôle négatif de l'élément suivant, on forme une pile dont la puissance est plus grande, en général, que celle d'un seul élément.

§ II. — Intensité d'un courant.

Quand un courant électrique passe dans un circuit conducteur, il peut y produire des effets multiples : un liquide traversé par le courant est décomposé; une portion du circuit s'échauffe, rougit et même peut être amenée au point de fusion; une aiguille aimantée placée dans le voisinage est déviée de sa position d'équilibre, etc. Ces divers effets, variables avec le courant lui-même, peuvent être choisis pour en mesurer l'*intensité*, et nous prendrons provisoirement, comme le plus simple, la décomposition de l'eau.

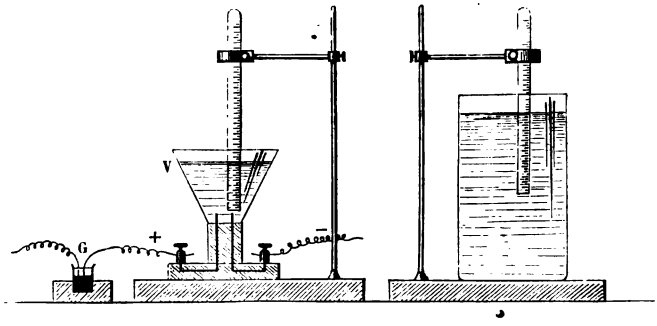
L'unité de courant sera le courant capable de décomposer 9 milligrammes d'eau en une seconde, ou, ce qui revient au

Digitized by Google

même, de dégager 1 milligramme d'hydrogène, et l'appareil qui sert à mesurer l'intensité d'un courant rapportée à l'unité précédente est le *voltamètre*.

Il se compose d'un vase de verre dont le fond est percé de deux trous, dans lesquels sont mastiqués deux fils de platine ayant à peu près $0^{mm},5$ de diamètre et 10^{mm} de hauteur. Les extrémités inférieures de ces fils, passant par le fond du vase, sont soudées à des bornes de laiton auxquelles on adapte les rhéophores de la pile. On remplit le vase d'eau aiguisée de $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique en volume, puis on dispose au-dessus des fils de platine de petites cloches graduées remplies d'eau (*fig.* 1).

Fig. 1.



Lorsque le courant voltaïque est établi avec cet appareil, l'eau est décomposée; l'oxygène se porte au fil positif et l'hydrogène au fil négatif, en volume double. Mais l'oxygène pourrait se combiner partiellement à l'eau, de sorte que son volume dans la cloche qui recouvre le fil positif serait légèrement inférieur à la moitié du volume de l'hydrogène. Il sera donc prudent, pour évaluer le poids d'eau décomposée, de mesurer seulement le volume de l'hydrogène.

Pour avoir l'intensité d'un courant qui traverse un voltamètre, il faudra donc mesurer le volume d'hydrogène dégagé pendant un certain temps, connu exactement. On en déduira, par une simple division, le volume dégagé pendant une se-

Digitized by Google

conde et le poids de ce gaz. Ce poids, exprimé en milligrammes, représentera numériquement l'intensité du courant.

Voici le détail de cette expérience; nous le donnons à cause de l'importance et de la simplicité de la méthode.

Le voltamètre V étant disposé avec ses deux cloches remplies d'eau au-dessus des fils de platine, on fixe à l'une des bornes un des rhéophores de la pile. De l'autre borne part un fil de cuivre qui se rend dans un godet G plein de mercure. Le second rhéophore de la pile se termine également par un fil de cuivre que l'on tient à la main et que l'on peut, à un moment donné, plonger dans le godet à mercure. On suit le mouvement des aiguilles d'une montre à secondes, et, au moment où l'aiguille des secondes commence le tour de son cadran, on plonge le bout du rhéophore négatif dans le mercure du godet. Immédiatement l'hydrogène s'élève dans la cloche du voltamètre. Lorsque le gaz est sur le point de remplir la cloche, on observe attentivement la montre, et, à l'instant où l'aiguille des secondes finit le tour de son cadran, on retire le rhéophore du godet. L'hydrogène cesse d'apparaître. On note le nombre de secondes écoulées pendant l'expérience. Nous désignerons ce nombre par la lettre T.

Pour lire le volume du gaz, on bouche avec le doigt l'extrémité ouverte de la cloche qui contient ce gaz et on la porte verticalement sur une cuve à eau; on l'enfonce de manière que le niveau de l'eau contenue dans la cloche soit sur le prolongement du niveau de l'eau contenue dans la cuve. On lit le volume cherché sur la division inscrite le long du tube. Cela fait, on mesure la hauteur barométrique et la température de l'air ambiant.

Nous désignons par V le volume du gaz en centimètres cubes, par H_0 la hauteur barométrique en millimètres, réduite à zéro, par t la température en degrés centigrades.

On cherche dans la Table suivante (Table I) la tension maxima de la vapeur d'eau, qui est relative à la température observée; nous appelons f cette valeur en millimètres de mercure.

Digitized by Google

L'intensité du courant est donnée par la formule

$$(1) \qquad I = \frac{V.0,0896(H_0 - f)}{T(1 + 0,003665.t)760}.$$

Pour faciliter le calcul, nous avons inscrit dans la Table II les valeurs de l'expression

$$\frac{0,0896(H_0 - f)}{(1 + 0,003665.t)760}$$

qui correspondent à diverses valeurs de $H_0 - f$ et de t.

Quant à la valeur de H_0, nous donnons dans la Table III, pour diverses hauteurs de mercure observées et pour diverses températures, le nombre qu'il faut retrancher de la valeur observée H pour obtenir H_0.

TABLE I.

Tension maxima de la vapeur d'eau.

t.	*f.*	*t.*	*f.*	*t.*	*f.*	*t.*	*f.*
	mm		mm		mm		mm
0	4,60	8	8,02	16	13,54	24	22,18
1	4,94	9	8,57	17	14,42	25	23,55
2	5,30	10	9,17	18	15,36	26	24,99
3	5,69	11	9,79	19	16,35	27	26,51
4	6,10	12	10,46	20	17,39	28	28,10
5	6,53	13	11,16	21	18,50	29	29,78
6	7,00	14	11,91	22	19,66	30	31,55
7	7,49	15	12,70	23	20,89	31	33,41

Digitized by Google

TABLE II. — Valeurs de $\frac{0,0896(H_0 - f)}{(1 + 0,003665.t)760}$.

$H_0 - f$.	TEMPÉRATURE.															
	0°.	2°.	4°.	6°.	8°.	10°.	12°.	14°.	16°.	18°.	20°.	22°.	24°.	26°.	28°.	30°.
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
700	8253	8193	8133	8075	8018	7961	7905	7850	7796	7742	7689	7637	7585	7535	7485	7435
702	8276	8216	8156	8098	8041	7984	7928	7872	7818	7764	7711	7659	7607	7556	7506	7456
704	8300	8239	8180	8121	8063	8006	7950	7895	7840	7786	7733	7681	7629	7578	7527	7478
706	8323	8263	8203	8144	8086	8029	7973	7917	7862	7808	7755	7702	7650	7599	7549	7499
708	8347	8286	8226	8167	8109	8052	7995	7940	7885	7830	7777	7724	7672	7621	7570	7520
710	8371	8310	8249	8191	8132	8075	8018	7962	7907	7852	7799	7746	7694	7642	7692	7541
712	8394	8333	8273	8214	8155	8097	8041	7984	7929	7875	7821	7768	7715	7664	7613	7563
714	8418	8357	8296	8237	8178	8120	8063	8007	7952	7897	7843	7790	7737	7685	7634	7584
716	8441	8380	8319	8260	8201	8143	8086	8029	7974	7919	7865	7811	7759	7707	7656	7605
718	8465	8403	8342	8283	8224	8166	8108	8052	7996	7941	7887	7833	7780	7728	7677	7626
720	8488	8427	8366	8306	8247	8188	8131	8074	8018	7963	7909	7855	7802	7750	7698	7648
722	8512	8450	8389	8329	8270	8211	8153	8097	8040	7985	7931	7877	7824	7772	7720	7669
724	8536	8473	8412	8352	8293	8234	8176	8119	8063	8007	7953	7899	7845	7793	7741	7690
726	8559	8497	8435	8375	8316	8256	8199	8142	8085	8029	7975	7921	7867	7815	7763	7711
728	8583	8520	8459	8398	8339	8279	8221	8164	8107	8051	7997	7942	7889	7836	7784	7733
730	8606	8544	8482	8421	8362	8302	8244	8186	8130	8074	8018	7964	7911	7858	7805	7754

Digitized by Google

TABLE II (suite). — Valeurs de $\frac{0,0896(H_0 - f)}{(1 + 0,003665.t)760}$.

$H_0 - f$.	TEMPÉRATURE.															
	0°.	2°.	4°.	6°.	8°.	10°.	12°.	14°.	16°.	18°.	20°.	22°.	24°.	26°.	28°.	30°.
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
732	8630	8567	8505	8444	8384	8325	8266	8209	8152	8096	8040	7986	7932	7879	7827	7775
734	8654	8591	8528	8467	8407	8348	8289	8231	8174	8118	8062	8008	7954	7901	7848	7796
736	8677	8614	8552	8490	8430	8370	8312	8254	8196	8140	8084	8030	7976	7922	7869	7818
738	8701	8637	8575	8513	8453	8393	8334	8276	8219	8162	8106	8051	7997	7944	7891	7839
740	8724	8661	8598	8537	8476	8416	8357	8299	8241	8184	8128	8073	8019	7965	7912	7860
742	8748	8684	8621	8560	8499	8439	8379	8321	8263	8206	8150	8095	8041	7987	7934	7881
744	8771	8708	8644	8583	8522	8461	8402	8343	8285	8228	8172	8117	8062	8008	7955	7903
746	8795	8731	8668	8606	8545	8484	8425	8366	8308	8251	8194	8139	8084	8030	7976	7924
748	8819	8754	8691	8629	8568	8507	8447	8388	8330	8273	8216	8161	8106	8051	7998	7945
750	8842	8778	8714	8652	8591	8530	8470	8411	8352	8295	8238	8182	8127	8073	8019	7966
752	8866	8801	8737	8675	8613	8552	8492	8433	8375	8317	8260	8204	8149	8094	8041	7988
754	8889	8825	8761	8698	8636	8575	8515	8456	8397	8339	8282	8226	8171	8116	8062	8009
756	8913	8848	8784	8721	8659	8598	8538	8478	8419	8361	8304	8248	8192	8137	8083	8030
758	8937	8871	8807	8744	8682	8621	8560	8500	8441	8383	8326	8270	8214	8159	8105	8051
760	8960	8895	8830	8767	8705	8643	8583	8523	8464	8405	8348	8292	8236	8181	8126	8073
762	8984	8918	8853	8790	8728	8666	8606	8546	8486	8427	8370	8314	8258	8203	8147	8094

Digitized by Google

TABLE III.

Réduction à 0° de la hauteur barométrique observée.

H.	TEMPÉRATURE.														
	2°.	4°.	6°.	8°.	10°.	12°.	14°.	16°.	18°.	20°.	22°.	24°.	26°.	28°.	30°.
720mm	0,23	0,47	0,70	0,94	1,17	1,40	1,64	1,88	2,11	2,35	2,58	2,81	3,05	3,28	3,52
724	0,24	0,47	0,71	0,94	1,18	1,41	1,65	1,89	2,12	2,36	2,60	2,83	3,07	3,30	3,54
728	0,24	0,47	0,71	0,95	1,19	1,42	1,66	1,90	2,13	2,37	2,61	2,85	3,09	3,32	3,56
732	0,24	0,48	0,72	0,95	1,19	1,43	1,67	1,91	2,15	2,39	2,63	2,86	3,10	3,34	3,58
736	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	1,68	1,92	2,16	2,40	2,64	2,88	3,12	3,36	3,60
740	0,24	0,48	0,72	0,96	1,21	1,45	1,69	1,93	2,17	2,41	2,65	2,89	3,14	3,38	3,62
744	0,24	0,48	0,73	0,97	1,21	1,45	1,70	1,94	2,18	2,43	2,67	2,91	3,15	3,39	3,64
748	0,24	0,49	0,73	0,97	1,22	1,46	1,71	1,95	2,19	2,44	2,68	2,92	3,17	3,41	3,66
752	0,24	0,49	0,74	0,98	1,22	1,47	1,72	1,96	2,21	2,45	2,70	2,94	3,19	3,43	3,68
756	0,25	0,49	0,74	0,98	1,23	1,48	1,72	1,97	2,22	2,46	2,71	2,96	3,21	3,45	3,70
760	0,25	0,50	0,74	0,99	1,24	1,49	1,73	1,98	2,23	2,48	2,73	2,97	3,22	3,47	3,72
764	0,25	0,50	0,75	0,99	1,25	1,49	1,74	1,99	2,24	2,49	2,74	2,99	3,24	3,49	3,74
768	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,76	3,00	3,26	3,50	3,76
772	0,25	0,50	0,75	1,00	1,26	1,51	1,76	2,01	2,26	2,52	2,77	3,02	3,27	3,52	3,78
776	0,25	0,51	0,76	1,01	1,26	1,52	1,77	2,03	2,27	2,53	2,78	3,03	3,29	3,54	3,79
780	0,25	0,51	0,76	1,01	1,27	1,52	1,78	2,04	2,29	2,54	2,80	3,05	3,31	3,56	3,81

Digitized by Google

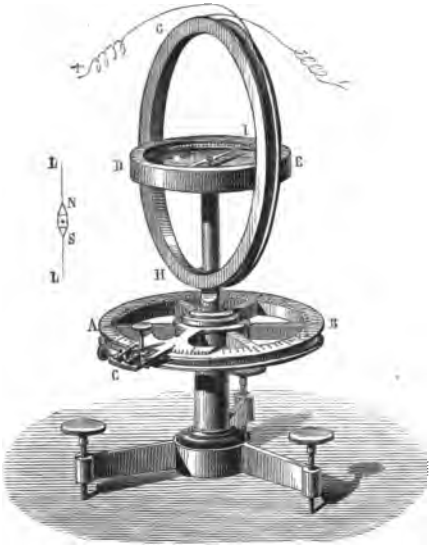
A l'aide de ces Tables, il sera aisé de réaliser la mesure dont il s'agit.

Les boussoles et les galvanomètres servent aussi à évaluer l'intensité des courants. Ces instruments ont l'avantage de donner des indications rapides, et, dans beaucoup de cas, ce sont les seuls qu'on puisse employer.

La boussole des tangentes est habituellement disposée pour les forts courants; le galvanomètre de Nobili sert pour les courants faibles. Voici comment il convient d'employer ces instruments.

Boussole des tangentes. — Un gros fil de cuivre recouvert de soie est plusieurs fois enroulé autour d'un cercle vertical G, de $0^m,40$ de diamètre (*fig.* 2). Ce cercle peut tourner autour

Fig. 2.



de son diamètre vertical. A la hauteur du centre de ce cercle se trouve un cadran horizontal DEI divisé en degrés, dont le centre est habituellement au centre du grand cercle. Il vaut mieux, d'après M. Gaugain, que les deux centres soient écartés l'un

Digitized by Google

de l'autre d'une longueur égale au quart du rayon du cercle. La ligne 0°-180° du cadran horizontal est parallèle au plan moyen du cercle vertical.

Un petit barreau aimanté NS est suspendu par un fil de soie sans torsion au-dessus du centre du cadran gradué horizontal. Une longue aiguille d'ivoire LL lui est fixée, et son extrémité parcourt les divisions du cadran quand l'aimant oscille.

Pour orienter l'appareil, on fait tourner le cercle vertical jusqu'à ce que l'aiguille mobile soit au zéro du cadran. L'aimant est alors à peu près parallèle au plan de ce cercle, et, par conséquent, ce dernier est à peu près dans le méridien magnétique. On manœuvre les vis calantes du pied de l'instrument de façon que les extrémités de l'aiguille soient respectivement au zéro et au n° 180 du cadran.

Pour se servir de l'instrument, on met le fil de cuivre du cercle dans le circuit voltaïque dont on cherche l'intensité, et l'on observe la déviation d de la grande aiguille lorsqu'elle est stationnaire; puis on change le sens du courant, ce qui produit une déviation de sens opposé d'; on prend la demi-somme $D = \frac{d + d'}{2}$ des deux nombres observés.

L'intensité du courant varie proportionnellement à la tangente de l'angle D.

Lorsqu'on veut seulement suivre les variations d'intensité sans avoir besoin de la valeur absolue du courant, on n'a qu'à chercher cette tangente dans les Tables trigonométriques. Nous donnons du reste les tangentes de degré en degré dans la Table suivante jusqu'à 45°, écart qu'il ne faut pas dépasser.

Digitized by Google

TABLE IV.

Tangentes des arcs de 1° à 44°.

ARCS.	TANGENTES.	ARCS.	TANGENTES.	ARCS.	TANGENTES.	ARCS.	TANGENTES.
1°	0,017	12°	0,213	23°	0,424	34°	0,675
2	0,035	13	0,231	24	0,445	35	0,700
3	0,052	14	0,249	25	0,466	36	0,727
4	0,070	15	0,268	26	0,488	37	0,754
5	0,087	16	0,287	27	0,510	38	0,781
6	0,105	17	0,306	28	0,532	39	0,810
7	0,123	18	0,325	29	0,554	40	0,839
8	0,141	19	0,344	30	0,577	41	0,869
9	0,158	20	0,364	31	0,601	42	0,900
10	0,176	21	0,384	32	0,625	43	0,933
11	0,194	22	0,404	33	0,649	44	0,966

Pour faire servir la boussole des tangentes aux mesures d'intensité rapportées à l'unité convenue précédemment, voici comment on opère.

On fait passer un courant en même temps dans la boussole et dans un voltamètre; on obtient ainsi d'une part tang$d$, d'autre part l'intensité I [formule (1)]. Dès lors on calcule le rapport

$$K = \frac{I}{\text{tang } D}. \tag{2}$$

Quand on aura, dans une expérience, observé une déviation quelconque, on cherchera dans la Table précédente la tangente de cet angle, et on la multipliera par le coefficient K, qui est toujours le même pour le même instrument.

Il importe de remarquer que l'aimant doit conserver le même degré d'aimantation pour que K soit constant. Il faut donc s'assurer, de temps en temps, si cette condition est satisfaite.

Pour cela, on doit compter combien d'oscillations l'aimant

Digitized by Google

fait en une minute quand on l'écarte de sa position d'équilibre; ce nombre ne change pas quand le magnétisme de l'aimant est invariable. Lorsqu'on observe quelque différence, il faut déterminer de nouveau le coefficient K.

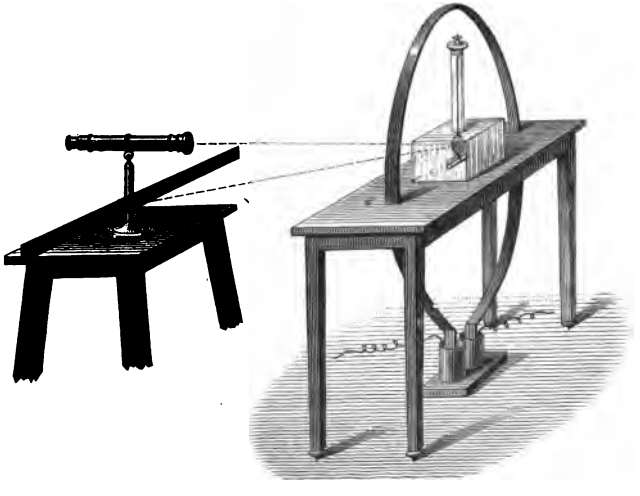
Une des difficultés de la boussole des tangentes consiste dans la lenteur avec laquelle l'aimant se met en équilibre sous l'influence du courant. Aussi, au lieu d'observer la déviation stationnaire d, comme nous l'avons d'abord supposé, on observe trois oscillations successives de l'aiguille, la première se terminant à la division d_1, la deuxième à la division d_2, la troisième à la division d_3, voisine de d_1; on prend pour valeur de d la quantité

$$\frac{d_1 + d_3 + 2d_2}{4} = d. \tag{3}$$

On fait de même pour d'.

Il faut, en général, que les déviations ne soient pas considérables, pour que les règles précédentes soient rigoureusement exactes. On emploie la disposition suivante lorsqu'on n'a que de

Fig. 3.



très petites déviations, et l'instrument acquiert alors une précision très grande.

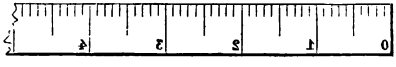
Digitized by Google

Le petit aimant porte un miroir plan vertical (*fig.* 3) (¹), suspendu de façon qu'il tourne autour d'un axe également vertical. On compose ordinairement ce miroir d'un petit disque de verre argenté sur l'une de ses faces.

A 1^m ou 2^m de ce miroir et un peu plus bas, on place une règle horizontale graduée, parallèle au plan du miroir lorsque l'aimant est au repos dans le méridien magnétique. Au-dessus de cette règle est une lunette qui peut tourner autour d'un axe horizontal en restant dans le même plan vertical. De cette manière on peut viser le miroir, et, après quelques tâtonnements, on trouve à quelle hauteur il faut placer la règle pour voir ses divisions par réflexion dans le miroir.

Celles-ci sont tracées renversées sur la règle, comme le représente la *fig.* 4, et on les voit droites par réflexion.

Fig. 4.



Il est aisé de comprendre que, si l'aimant de la boussole est dévié, il entraîne le miroir, et l'on aperçoit dans la lunette, au moment où l'aiguille s'arrête, une nouvelle division de la règle. Le nombre des divisions qui ont passé devant le réticule de la lunette est proportionnel à la tangente de l'angle de déviation; mais il est inutile, pour connaître cet angle, d'attendre que l'aiguille soit stationnaire. On observe trois oscillations successives, n_1, n_2, n_3, et l'on calcule ensuite la quantité

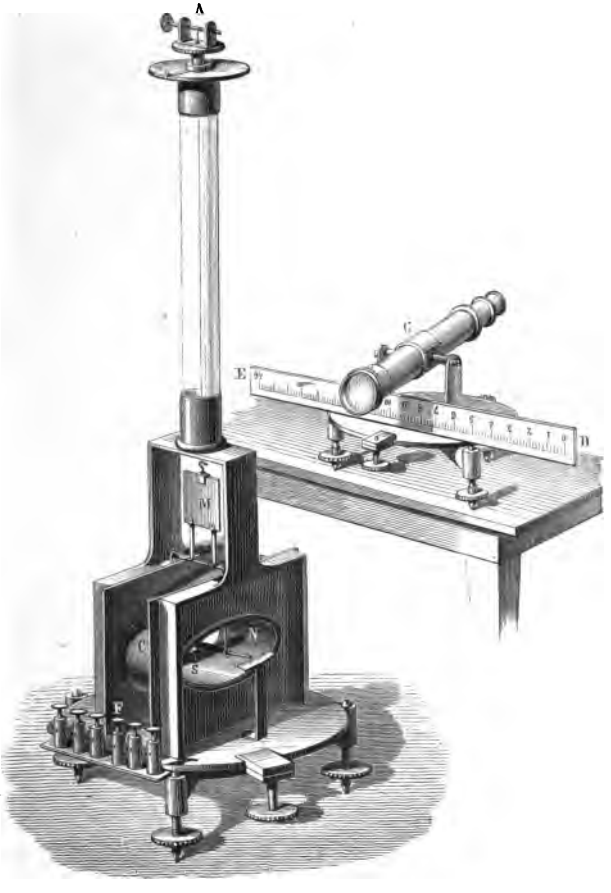
$$n = \frac{n_1 + n_3 + 2n_2}{4}; \tag{4}$$

cette quantité représente la position d'équilibre de l'aiguille d'une manière suffisamment exacte lorsque les écarts sont peu

(¹) Dans la *fig.* 3, le conducteur circulaire du courant est une simple lame de cuivre enroulée en cercle et ayant ses deux extrémités plongées dans des godets contenant du mercure, auxquels aboutissent les rhéophores. La boussole ainsi établie est d'une construction très facile.

Digitized by Google

Fig. 5.



LÉGENDE.

NS, barreau aimanté suspendu par un paquet de fils de soie sans torsion, enroulé sur le treuil A. — F, bornes au moyen desquelles on fait passer le courant autour de l'aimant, soit dans un simple anneau de cuivre, soit dans une bobine à fil gros et court, soit dans une bobine C à fil fin et long. — M, miroir qui tourne avec le barreau aimanté. — G, lunette qui vise dans le miroir M l'image par réflexion des divisions d'une échelle DE, ce qui permet d'apprécier les déviations très petites que le courant imprime à l'aimant.

Digitized by Google

considérables et que les oscillations ont peu d'amplitude. On détermine de même n' en renversant le courant, et enfin l'on a

$$(5) \qquad I = K\frac{n-n'}{2}.$$

Cette méthode est très précieuse. Des déviations de l'aimant, inappréciables sur un cadran ordinaire, sont mesurées de cette manière avec exactitude. Pour le comprendre, il suffit de calculer la longueur d'arc interceptée par un angle de 1° sur une circonférence de 2^m de rayon (elle est de $0^m,035$ environ) et de remarquer qu'une déviation de 1° éprouvée par l'aiguille produit dans la lunette de l'appareil l'effet de 2°; on a ainsi $0^m,070$ de la règle qui passent dans le champ de la vision, de sorte qu'une déviation de 1′ devient appréciable, puisqu'elle correspond à plus de $0^m,001$ de la règle.

Pour les courants de faible intensité, on fait souvent usage de la boussole de Weber, qui est analogue à celle que nous venons de décrire. On y trouve l'aimant à miroir et, au lieu du grand cercle vertical, un châssis de section elliptique sur lequel est enroulé un long fil de cuivre recouvert de soie. Nous nous contentons de donner le dessin (*fig.* 5) et une légende explicative. Cet instrument, en effet, se rapporte, quant au principe, au type du galvanomètre multiplicateur à une seule aiguille.

Galvanomètre multiplicateur. — Le plus usité est celui de Nobili, qui se compose d'un châssis vertical sur lequel s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie et d'un système de deux aiguilles aimantées, fixées perpendiculairement à une tige de cuivre et dans le même plan; cette tige est suspendue par un fil de cocon, de sorte que les aiguilles se tiennent horizontalement; l'aiguille inférieure est au centre du châssis, l'autre est au-dessus et parcourt les divisions d'un cadran. Ajoutons enfin que ces deux aiguilles sont à peu près également aimantées et qu'elles ont leurs pôles différents placés du même côté.

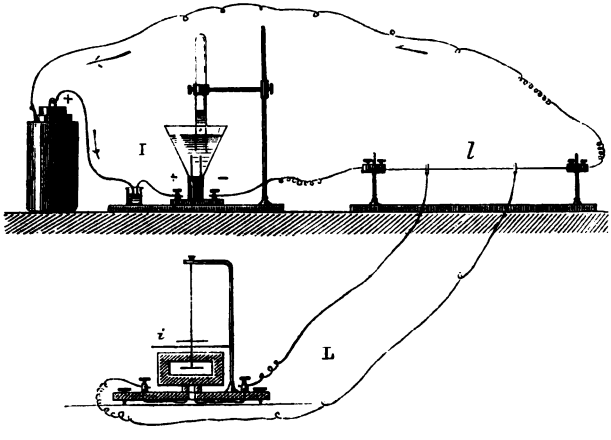
On construit deux formes d'instruments de ce genre : le galvanomètre à fil gros et court, pour les expériences thermo-

Digitized by Google

électriques, et le galvanomètre à fil fin et long, pour les expériences électro-chimiques. Dans le premier, le fil n'a qu'une trentaine de tours sur le châssis; dans le second il en a jusqu'à trente mille. Ce sont des appareils très délicats et qui ne peuvent guère être employés que dans les laboratoires spéciaux de Physique. Lorsque la déviation ne dépasse pas 20°, elle est sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant. Les instruments de ce genre donnent donc immédiatement les rapports d'intensité. Pour avoir l'intensité absolue il faut, comme pour la boussole des tangentes, déterminer le coefficient par lequel on doit multiplier le nombre de degrés de déviation qu'on a observé.

Le procédé qui offre le plus de simplicité consiste à disposer un circuit voltaïque contenant un voltamètre et à prendre sur ce circuit une dérivation par le galvanomètre (*fig.* 6).

Fig. 6.



Le cas le plus simple est celui où l'intervalle de dérivation est formé par un fil de même substance et de même diamètre que celui du galvanomètre. On mesure la longueur L de ce dernier et la longueur *l* de l'intervalle de dérivation, puis, à l'aide du voltamètre, l'intensité I du courant principal, et enfin la déviation D observée sur le galvanomètre; on a alors entre ces

Digitized by Google

quatre quantités la relation

$$(6) \qquad I = KD\frac{L+l}{l}.$$

On calculera d'après cette formule le coefficient K.

Quand on connaît ce coefficient, qui ne dépend que du galvanomètre, il suffit de le multiplier par la déviation observée dans un circuit quelconque, pour avoir l'intensité absolue du courant qui a produit cette déviation.

La difficulté de cette méthode consiste à régler la longueur l de l'intervalle de dérivation de façon que les indications du voltamètre et du galvanomètre soient d'une grandeur convenable.

Le procédé le plus simple consiste à tendre en ligne droite un fil semblable à celui du galvanomètre et à lui appliquer en deux points des pinces pour la dérivation par le galvanomètre. On réglera par tâtonnement la distance de ces pinces, de façon que la déviation ne dépasse pas 20° quand le circuit voltaïque est établi.

Cette méthode est d'ailleurs très générale; quel que soit le rapport de la déviation galvanométrique D avec l'intensité i du courant qui passe dans le fil du galvanomètre, on peut, par un moyen analogue, calculer une Table faisant connaître les valeurs de i qui correspondent aux diverses valeurs de D. Ces valeurs sont données par la formule

$$(7) \qquad i = I\frac{l}{L+l}.$$

On calcule i par cette formule, et l'on observe D directement.

Nous verrons plus tard comment, lorsqu'on ne peut se procurer un fil semblable à celui du galvanomètre pour former l'intervalle de dérivation, on doit calculer pour l la longueur du fil galvanométrique qui équivaut au fil de dérivation. Il suffit de connaître la section et le coefficient de résistance de chacun de ces fils.

Le même procédé s'applique à toute espèce d'instrument.

Comme on n'a pas toujours à sa disposition une boussole ou un galvanomètre, nous croyons utile de faire connaître le parti

Digitized by Google

que l'on peut tirer de la balance ordinaire, comment on peut la transformer en un excellent rhéomètre.

Au fléau d'une balance on suspend un cylindre de fer dans l'axe d'une bobine creuse, recouverte d'un fil de cuivre isolé et maintenue verticalement. Au-dessous de cette bobine se trouve un petit électro-aimant rectiligne. Le courant doit passer en sens opposés dans la bobine creuse et dans l'électro-aimant. De cette façon, le cylindre de fer est repoussé par l'électro-aimant, et l'on règle sa position de façon qu'il soit, au contraire, attiré par la bobine creuse, dans laquelle il entre par le haut seulement. On trouve, après quelques tâtonnements, une position d'équilibre très stable que prend le cylindre de fer dès qu'un courant passe, et pour laquelle le fléau de la balance est oblique.

Si l'on met des poids marqués dans le bassin suspendu à l'autre extrémité du fléau, de manière que le fléau se place horizontalement, les poids sont approximativement proportionnels aux carrés des intensités du courant. En voici un exemple [*Détermination de la quantité de magnétisme d'un aimant ou d'un électro-aimant rectiligne*, par A. Cazin (*Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XXVIII; 1873)] :

Le cylindre de fer doux a $0^m,12$ de longueur et $0^m,008$ de diamètre. Le diamètre intérieur de la bobine creuse est de $0^m,02$, et sa longueur est celle du cylindre de fer. Le petit électro-aimant rectiligne placé au-dessous a un noyau de $0^m,02$ de diamètre et de $0^m,08$ de hauteur.

Intensités.....	0,00753	0,01166	0,02206	0,02636	0,03351
Poids.....	$0^{gr},778$	$1^{gr},847$	$6^{gr},485$	$9^{gr},375$	$15^{gr},192$

Les avantages du *rhéomètre-balance* sont les suivants :

1° Les indications sont très rapides.

2° On peut se servir du même appareil entre des limites d'intensité très écartées, depuis les intensités les plus faibles jusqu'à celle d'un circuit de 100 éléments de Bunsen.

3° L'appareil est très sensible. Un changement de $0^m,01$ dans la longueur du fil d'un rhéostat (laiton, diamètre de $\frac{1}{3}$ de millimètre) produit un changement d'intensité appréciable.

Digitized by Google

Il résulte de cet avantage et du premier que le *rhéomètre-balance* est très commode pour maintenir la constance d'un courant : il suffit de mettre un rhéostat dans le circuit et de maintenir le fléau de la balance horizontal en agissant sur le rhéostat.

Pour construire la Table des intensités absolues, il suffit de mettre dans le circuit le voltamètre, ou tout appareil déjà gradué, et d'observer les poids nécessaires pour maintenir le fléau horizontalement en équilibre, quand le courant passe, avec diverses intensités. On fait varier l'intensité d'une manière quelconque, soit en interposant des fils, soit en changeant le nombre des éléments de la pile.

On trace sur une feuille de papier quadrillé les points qui représentent ces diverses expériences, en prenant les valeurs des poids comme abscisses et les intensités absolues déduites de l'observation au voltamètre comme ordonnées. On fait passer par ces points un trait continu, et cette ligne sert au calcul de la Table de comparaison.

L'approximation est d'autant plus grande que les abscisses et les ordonnées sont plus grandes.

Nous nous contenterons d'indiquer ce procédé graphique. On conçoit qu'on puisse le remplacer par une formule empirique qui donnera une meilleure approximation.

§ III. — Résistance.

Résistance d'un conducteur. — Lorsqu'on interpose dans un circuit voltaïque un fil de métal, on diminue d'autant plus l'intensité du courant que le fil est plus long et plus fin. De plus, si l'on remplace un fil de cuivre par un fil de fer de mêmes dimensions, on diminue encore l'intensité du courant : on dit que ce fil oppose *une résistance* au passage du courant.

On a reconnu que la résistance dont il s'agit est proportionnelle à la longueur du fil et en raison inverse de sa section, de sorte que, si l'on désigne par l la longueur et par s la section,

Digitized by Google

on pourra poser la formule de la résistance

$$R = \frac{l}{cs}, \tag{8}$$

c étant un coefficient qui dépend de la nature du conducteur. On l'appelle *coefficient de conductibilité.*

Nous adoptons provisoirement pour unité de résistance celle d'un cylindre de mercure ayant 1^m de long et 1^{mmq} de section. On réalise un tel conducteur en remplissant de mercure un tube de verre ayant les dimensions indiquées. Quand on remplit de ce liquide un tube qui a une longueur de l mètres et une section de s millimètres, sa résistance est simplement $\frac{l}{s}$.

Quand il s'agit d'un conducteur cylindrique d'une autre substance, il faut multiplier le rapport $\frac{l}{s}$ par la quantité $\frac{1}{c}$, qu'on appelle *résistance spécifique* de la substance.

Nous donnons ici le Tableau des résistances spécifiques des principales substances (Tableau V). Ces nombres sont les résistances d'un cylindre de chaque substance qui aurait 1^m de long et 1^{mmq} de section. On a choisi les solides et les solutions qui sont en usage dans les piles.

Digitized by Google

TABLE V.

Résistances spécifiques.

MÉTAUX PURS (MATTHIESSEN) A 0°.	
Argent { recuit	0,016
Argent { écroui	0,017
Cuivre	0,017
Or	0,022
Aluminium recuit	0,031
Zinc comprimé	0,059
Platine recuit	0,095
Fer recuit	0,102
Alliage (2 or, 1 argent)	0,114
Nickel recuit	0,131
Étain comprimé	0,139
Plomb comprimé	0,207
Antimoine comprimé	0,373
Mercure	1,000
Bismuth comprimé	1,379
SUBSTANCES DIVERSES (MATTHIESSEN).	
Graphite	de 24 à 418
Coke	43
Charbon de pile Bunsen	670
LIQUIDES (BECQUEREL).	
Acide azotique à 36° de l'aréomètre. Température, 13°	20560
Solution saturée de sel marin » 13°	61160
» » d'azotate de cuivre. » 13°	214300
» » de sulfate de zinc.. » 14°	334100
» » de sulfate de cuivre. » 9°	355700
Eau distillée (MATTHIESSEN)	93000000
Eau avec $\frac{1}{20000}$ d'acide sulfurique	15000000

La résistance des métaux du commerce est toujours supérieure à celle des métaux purs. Pour le cuivre, la différence peut atteindre 50 pour 100.

Influence de la température (*Matthiessen*). — Pour tous les métaux purs, à l'exception du fer, du thallium et du mer-

Digitized by Google

cure, on a, en appelant R_0 la résistance à 0° C. et t la température centigrade,

$$R = R_0(1 + 0,003824t + 0,00000126t^2); \tag{9}$$

pour le mercure,

$$R = R_0(1 + 0,0007485t - 0,000000398t^2). \tag{10}$$

Enfin nous donnons ici le Tableau des résistances spécifiques de divers mélanges d'eau et d'acide sulfurique ou d'acide azotique. Comme ces résistances changent rapidement avec la température, et qu'il est souvent utile de les connaître dans les applications, le Tableau est calculé de 4° en 4°.

TABLE VI.

POIDS spécifique.	0°.	4°.	8°.	12°.	16°.	20°.	24°.	28°.
Résistance de l'acide sulfurique étendu d'eau (Matthiessen) à diverses températures.								
1,10	13700	11700	10400	9300	8500	7900	7400	7100
1,20	13300	11100	9300	7900	6700	5700	4900	4100
1,25	13100	10900	9000	7400	6200	5100	4300	3600
1,30	13600	11300	9400	7900	6600	5600	4700	3900
1,40	16900	14700	13000	11600	10500	9600	9000	8400
1,50	27400	24100	21300	18900	17200	16100	15200	14300
1,60	48300	41700	36300	31200	27500	24600	22100	20200
1,70	94300	76900	62700	51400	42400	35800	30800	27100
Résistance de l'acide azotique hydraté.								
1,36	19400	18300	16500	15000	13900	13000	12200	11800

§ IV. — Force électro-motrice.

Force électro-motrice d'une pile. — On donne ce nom à l'intensité du courant que la pile développerait si le circuit

Digitized by Google

total, pile comprise, avait une résistance égale à l'unité. Cette quantité est proportionnelle au nombre des éléments qui composent la pile lorsque tous les éléments sont de même espèce et disposés en série, c'est-à-dire de telle sorte que le pôle positif de l'un communique avec le pôle négatif du suivant. Si l'on désigne par e la force électro-motrice d'un seul élément, par n leur nombre, par E la force électro-motrice d'une pile de n éléments disposés en série, on a

$$E = ne.$$

La force électro-motrice e d'un élément quelconque est constante ou variable suivant la nature des piles. De là la distinction de deux classes de piles : celles qui ont une force électro-motrice variable (type : pile de Volta), celles qui ont une force électro-motrice constante (type : pile de Daniell).

La pile est nécessairement constante lorsque les réactions chimiques qui s'y accomplissent ne modifient pas l'état des substances qui sont l'origine du courant électrique. Elle est variable lorsque les modifications chimiques qui s'y accomplissent font varier la production de l'électricité. En général, ces modifications diminuent la force électro-motrice.

Dans un élément de pile à courant variable, on peut représenter la force électro-motrice par $e - p$, e étant la force électro-motrice de l'élément avant qu'il ait subi les modifications qui l'affaiblissent et p une quantité qui augmente avec ces modifications, qui est en quelque sorte leur effet électrique. On lui donne le nom de *force de polarisation*.

Lorsque le courant traverse un liquide à l'aide de deux conducteurs qui s'y trouvent immergés, il y a une *altération* de ces conducteurs, par suite du dépôt que détermine sur chacun d'eux la décomposition chimique du liquide. Il résulte de ce dépôt une diminution d'intensité du courant, et on la représente algébriquement en imaginant une *force de polarisation* analogue à celle que nous avons signalée dans chaque élément d'une pile variable.

En général, la force électro-motrice d'un circuit voltaïque

Digitized by Google

comprenant des éléments de pile et des électrolytes se représente par une somme de termes, les uns positifs, les autres négatifs. Les premiers représentent l'intensité qu'aurait le courant si la résistance totale du circuit était égale à l'unité et s'il n'y avait aucune action chimique modifiant l'état des surfaces qui sont la source du courant; les seconds représentent la diminution de cette intensité qui résulte de l'altération des surfaces aussi bien dans la pile que dans les électrolytes. On formule algébriquement la force électro-motrice totale du circuit comme il suit,

$$E = \Sigma e - \Sigma p, \tag{11}$$

le signe Σe désignant la somme des valeurs de e qui conviennent aux divers éléments de la pile avant que les liquides qui s'y trouvent soient altérés, et Σp celle des valeurs de p qui conviennent aux divers liquides placés dans le circuit, soit dans la pile, soit dans les électrolytes, lorsque ces liquides affaiblissent le courant par suite des dépôts qu'ils produisent sur les conducteurs qui s'y trouvent plongés.

Il résulte de ces observations que le voltamètre à eau donne lieu à une perturbation dans un circuit dont il fait partie, car les fils de platine qui s'y trouvent plongés se recouvrent l'un d'oxygène, l'autre d'hydrogène, et ces dépôts diminuent l'intensité du courant; ils déterminent une *force de polarisation;* mais le plus souvent cet effet est négligeable, surtout quand on emploie des fils de platine de petite surface.

Loi de Ohm. — L'intensité du courant développé par une pile donnée dépend de la résistance totale du circuit comprenant la pile et les conducteurs qui réunissent extérieurement ses pôles. Ohm, en Allemagne, Pouillet, en France, ont trouvé la relation de ces deux quantités, le premier par des considérations théoriques, le second par l'expérience. L'intensité est inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit, ce qui s'exprime par la formule

$$I = \frac{A}{R + R'}. \tag{12}$$

Digitized by Google

I désigne l'intensité du courant;

R, la résistance du conducteur extérieur;

R', la résistance de la pile;

A, une quantité invariable pour le même circuit tant que les surfaces hétérogènes en contact n'ont pas subi de modifications chimiques capables de les transformer en nouvelles sources d'électricité contraire à celle du courant primitif.

Il résulte de cette formule et de la définition donnée plus haut de la force électro-motrice totale que la quantité A est identiquement cette force électro-motrice, car, si $R + R' = 1$, il est clair que l'intensité I acquiert la valeur particulière A. De là la formule très générale de Ohm :

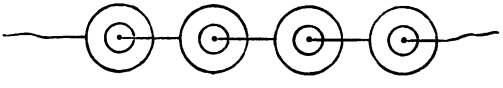
$$I = \frac{\Sigma e - \Sigma p}{R + R'}. \tag{13}$$

§ V. — Association des éléments d'une pile.

Le seul cas usité est celui où les éléments sont identiques.

Disposition en une seule série. — Désignons par N leur nombre, par e la force électro-motrice totale de l'un d'eux en y comprenant la force de polarisation qui peut s'y développer, par r la résistance de chaque élément. Supposons que ces éléments soient réunis en une seule série (*fig.* 7). On a, en négligeant les forces de polarisation des électrolytes placés dans le circuit,

Fig. 7.



$$A = Ne \quad \text{et} \quad R' = Nr.$$

Par suite, la formule (12) de Ohm donne

$$I = \frac{Ne}{Nr + R}. \tag{14}$$

Digitized by Google

Cette formule montre que, si R est très petit devant Nr, on a sensiblement

$$I = \frac{Ne}{Nr} = \frac{e}{r}, \tag{15}$$

de sorte que l'effet est à peu près le même que si l'on employait un seul élément.

C'est ce qui a lieu lorsqu'il s'agit de faire passer le courant à travers un conducteur dont la résistance est très petite devant celle d'un élément de pile. Il n'y a alors aucun avantage à prendre une série d'éléments; un seul suffit. Ainsi veut-on chauffer au rouge par le courant un fil de métal de très faible résistance, il faut le faire communiquer avec les pôles d'un seul élément à l'aide de très gros conducteurs de cuivre rouge, et, si l'élément ne produit pas l'effet voulu, il est inutile d'essayer une série de plusieurs éléments semblables au précédent. Il faut recourir à une autre disposition.

Disposition en surface. — Si l'on fait communiquer ensemble toutes les parties positives des N éléments d'une part et toutes les parties négatives d'autre part, on obtient pour la résistance de la pile une quantité N fois moindre que celle d'un seul élément, de sorte que

$$I = \frac{e}{\frac{r}{N} + R} = \frac{Ne}{r + NR}. \tag{16}$$

Si la résistance extérieure R est assez petite pour que NR soit négligeable devant r, on a sensiblement

$$I = \frac{Ne}{r}, \tag{17}$$

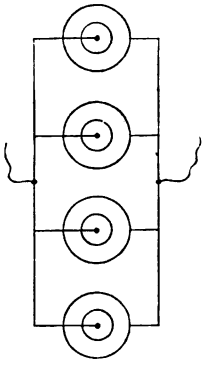
d'où l'on conclut que l'intensité est, dans ce cas, sensiblement proportionnelle au nombre des éléments ainsi associés (*fig.* 8). C'est ce qu'il faudrait faire pour l'échauffement d'un bout de fil de métal peu résistant.

Calcul de la disposition la plus avantageuse. — *On donne un nombre* $N = m \times n$ *éléments identiques et une résistance*

Digitized by Google

extérieure R *que le courant doit vaincre. On connaît d'ailleurs la force électro-motrice e et la résistance r de chaque élément; on se propose de trouver le meilleur mode d'ar-*

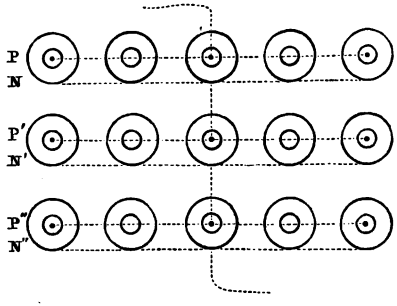
Fig. 8.



rangement de ces éléments, celui qui donnera le maximum d'intensité.

Imaginons (*fig.* 9) *m* séries parallèles, chacune comprenant *n* éléments. En réunissant ces *m* séries par leurs pôles

Fig. 9.



semblables, on constitue une pile de *n* éléments, où chaque élément aurait une surface *m* fois plus grande qu'un seul. Par conséquent, la résistance de chacun de ces *n* éléments sera $\frac{r}{m}$,

Digitized by Google

et la résistance de la pile entière sera

$$R' = \frac{nr}{m}.$$

D'ailleurs la force électro-motrice totale sera

$$A = ne,$$

de sorte que l'intensité est donnée par la formule

$$I = \frac{ne}{\frac{nr}{m} + R} = \frac{nme}{nr + mR}$$

ou bien

(18) $$I = \frac{Ne}{nr + mR} = \frac{Nne}{n^2 r + NR}.$$

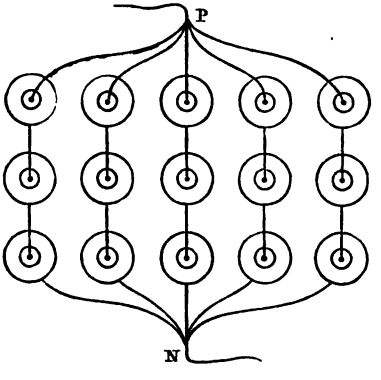
On vérifiera aisément que cette quantité varie quand on change n, le reste ne changeant pas, et qu'elle devient maxima lorsque $n^2 r = NR$, ou bien $n^2 r = nmR$, ou enfin

(19) $$\frac{nr}{m} = R,$$

c'est-à-dire lorsque la résistance totale de la pile $\frac{nr}{m}$ est égale à la résistance extérieure R.

Dans la pratique, on emploie la disposition de la *fig.* 10, dans

Fig. 10.



laquelle les pôles extrêmes des m séries parallèles sont seuls

Digitized by Google

réunis entre eux. L'effet est le même que dans le cas précédent et l'assemblage est plus simple.

Exemple numérique. — *Considérons* 80 *éléments de Bunsen ordinaires, à charbon intérieur, pour lesquels on a habituellement* $e = 0,024$ *et* $r = 1$. *Les formules précédentes donnent pour une résistance extérieure* $R = 5$ *les valeurs suivantes :*

$$n = 20, \quad m = 4, \quad I = 0,048.$$

Telle est la plus grande intensité que l'on peut obtenir avec les éléments donnés lorsque la résistance extérieure est 5; *toute autre combinaison des* 80 *éléments donnerait une moindre intensité.*

Pour rendre ce fait manifeste, nous avons calculé la Table VII suivante, dans laquelle sont inscrites les intensités correspondant aux diverses valeurs de n, formées par les diviseurs de 80 :

TABLE VII.

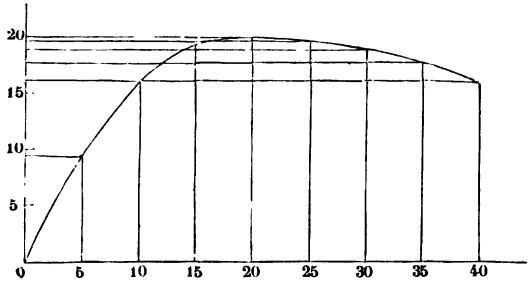
n.	m.	I.
1	80	0,0047
2	40	0,0095
4	20	0,0184
5	16	0,0226
8	10	0,0331
10	8	0,0384
16	5	0,0468
20	4	0,0480 (max.)
40	2	0,0384
80	1	0,0226

On voit qu'une seule série de 80 éléments simples donne une intensité inférieure à la moitié du maximum qui correspond à quatre séries parallèles de 20 éléments, réunies en surface.

Digitized by Google

La *fig.* 11 représente une courbe passant par les points qui ont pour abscisses les valeurs précédentes de n et pour ordon-

Fig. 11.



nées celles de I. C'est une courbe du troisième degré de la forme

(20 $$ax^2y + by + cx = 0.$$

Pour chaque groupe de valeurs de R, e, r, N, on aura une courbe analogue à celle de la figure; mais les points de cette courbe ne peuvent tous représenter une solution; ceux qui conviennent seuls ont pour abscisses les diviseurs de N.

Problème. — *On veut avoir un courant d'une intensite donnée* I, *à l'aide d'une pile dont chaque élément possède une force électro-motrice e et une résistance r, le circuit extérieur ayant une résistance* R : *quel est le minimum d'éléments qu'il faut employer et comment faut-il les disposer?*

Les inconnues sont le nombre d'éléments m qu'on doit réunir en surface et le nombre n des séries parallèles et égales ainsi formées.

S'il y a des valeurs entières de n et m satisfaisant aux équations

(21) $$nr = m\mathrm{R},$$

(22) $$\mathrm{I} = \frac{me}{2r},$$

ces valeurs sont la réponse cherchée.

Digitized by Google

On le vérifiera en résolvant ces équations. On en tire

$$(23) \qquad n = \frac{2RI}{e}, \quad m = \frac{2rI}{e}.$$

Lorsque R, I, e, r sont des nombres quelconques, on ne trouve pas des valeurs entières pour n et m. On augmentera dans ce cas la valeur de I pour rendre m entier, puis on diminuera celle de R, s'il le faut, pour rendre n entier. La pile ainsi constituée donnera un courant un peu plus fort que celui qu'on demande pour une résistance un peu plus faible que la résistance proposée; elle conviendra donc à la question; il suffira d'ajouter au circuit un rhéostat pour qu'on puisse amener le courant à l'intensité voulue I, en augmentant convenablement la résistance.

Exemple. — *On se sert d'éléments de Bunsen ordinaires, à charbon intérieur, pour lesquels on a le plus souvent* $e = 0,024$ et $r = 1$. *On veut une intensité* 0,090 *avec une résistance extérieure* $R = 0,77$.

On a $m = \frac{2rI}{e} = 7,5$ et, pour $I = 0,096$, $m = 8$; alors $n = \frac{2RI}{e} = 6,16$ et, pour $R = 0,75$, $n = 6$. On adoptera donc $n \times m = 6 \times 8 = 48$ éléments disposés en huit séries parallèles de 6 éléments.

Nous donnons dans la Table VIII les combinaisons des éléments ordinaires de Bunsen pour diverses valeurs de I et de R.

On y trouve l'exemple précédent, qui servira à montrer l'usage de cette Table. L'intensité $I = 0,090$ qui est donnée ne se trouvant pas dans la première ligne horizontale, on prend la valeur qui en diffère le moins par excès, à savoir 0,096; au-dessous de ce nombre est la valeur $m = 8$. On descend verticalement jusqu'à ce qu'on rencontre la résistance 0,75 immédiatement inférieure au nombre donné 0,77, et, en suivant horizontalement à gauche, on trouve la valeur $n = 6$, qui achève de résoudre le problème.

Digitized by Google

TABLE VIII

pour calculer le nombre et la disposition des éléments Bunsen ordinaires ($e = 0,024$, $r = 1$) qu'il faut employer pour produire une intensité donnée I dans une résistance donnée R.

Intensité donnée I...	0,012	0,024	0,036	0,048	0,060	0,072	0,084	0,096	0,108	0,120	0,240	0,360	0,480	0,600	0,720	0,840	0,960	1,080	1,200
m.....	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
n.	VALEURS DE LA RÉSISTANCE DONNÉE R.																		
1	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,05	0,033	0,025	0,02	0,017	0,015	0,012	0,011	0,010
2	2,00	1,00	0,66	0,50	0,40	0,33	0,28	0,25	0,22	0,20	0,10	0,067	0,05	0,04	0,033	0,03	0,02	0,02	0,02
3	3,00	1,50	1,00	0,75	0,60	0,50	0,43	0,38	0,33	0,30	0,15	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
4	4,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,66	0,57	0,50	0,44	0,40	0,20	0,13	0,10	0,08	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04
5	5,00	2,50	1,66	1,25	1,00	0,83	0,71	0,63	0,55	0,50	0,25	0,17	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
6	6,00	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,66	0,60	0,30	0,20	0,15	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,06
7	7,00	3,50	2,33	1,75	1,40	1,17	1,00	0,88	0,77	0,70	0,35	0,23	0,17	0,14	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07
8	8,00	4,00	2,66	2,00	1,60	1,33	1,14	1,00	0,88	0,80	0,40	0,27	0,20	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
9	9,00	4,50	3,00	2,25	1,80	1,50	1,28	1,13	0,99	0,90	0,45	0,30	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09
10	10,00	5,00	3,33	2,50	2,00	1,66	1,43	1,25	1,10	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10
15	15,00	7,50	5,00	3,75	3,00	2,50	2,14	1,88	1,67	1,50	0,75	0,50	0,37	0,30	0,25	0,21	0,19	0,17	0,15
20	20,00	10,00	6,66	5,00	4,00	3,33	2,85	2,50	2,22	2,00	1,00	0,67	0,50	0,40	0,33	0,28	0,25	0,22	0,20
25	25,00	12,50	8,33	6,25	5,00	4,16	3,57	3,12	2,77	2,50	1,25	0,83	0,62	0,50	0,41	0,36	0,31	0,28	0,25
30	30,00	15,00	10,00	7,50	6,00	5,00	4,28	3,75	3,33	3,00	1,50	1,00	0,75	0,60	0,50	0,43	0,37	0,33	0,30

Digitized by Google

TABLE VIII (suite)

pour calculer le nombre et la disposition des éléments Bunsen ordinaires ($e = 0,024$, $r = 1$) qu'il faut employer pour produire une intensité donnée I dans une résistance donnée R.

Intensité donnée I...	0,012	0,024	0,036	0,048	0,060	0,072	0,084	0,096	0,108	0,120	0,240	0,360	0,480	0,600	0,720	0,840	0,960	1,080	1,200
m.....	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
n.	VALEURS DE LA RÉSISTANCE DONNÉE R.																		
35	35,00	17,50	11,67	8,75	7,00	5,83	5,00	4,37	3,89	3,50	1,75	1,17	0,87	0,70	0,58	0,50	0,44	0,39	0,35
40	40,00	20,00	13,33	10,00	8,00	6,67	5,71	5,00	4,44	4,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67	0,57	0,50	0,44	0,40
45	45,00	22,50	15,00	11,25	9,00	7,50	6,43	5,62	5,00	4,50	2,25	1,50	1,12	0,90	0,75	0,64	0,56	0,50	0,45
50	50,00	25,00	16,67	12,50	10,00	8,33	7,14	6,25	5,55	5,00	2,50	1,67	1,25	1,00	0,83	0,71	0,62	0,55	0,50
55	55,00	27,50	18,33	13,75	11,00	9,16	7,85	6,87	6,11	5,50	2,75	1,83	1,37	1,10	0,91	0,78	0,69	0,61	0,55
60	60,00	30,00	20,00	15,00	12,00	10,00	8,57	7,50	6,67	6,00	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67	0,60
65	65,00	32,50	21,67	16,25	13,00	10,83	9,28	8,12	7,22	6,50	3,25	2,17	1,62	1,30	1,08	0,93	0,81	0,72	0,65
70	70,00	35,00	23,33	17,50	14,00	11,67	10,00	8,75	7,78	7,00	3,50	2,33	1,75	1,40	1,17	1,00	0,87	0,78	0,70
75	75,00	37,50	25,00	18,75	15,00	12,50	10,71	9,37	8,33	7,50	3,75	2,50	1,87	1,50	1,25	1,07	0,94	0,83	0,75
80	80,00	40,00	26,67	20,00	16,00	13,33	11,43	10,00	8,89	8,00	4,00	2,67	2,00	1,60	1,33	1,14	1,00	0,89	0,80
85	85,00	42,50	28,33	21,25	17,00	14,16	12,14	10,62	9,44	8,50	4,25	2,83	2,12	1,70	1,42	1,21	1,06	0,94	0,85
90	90,00	45,00	30,00	22,50	18,00	15,00	12,85	11,25	10,00	9,00	4,50	3,00	2,25	1,80	1,50	1,28	1,12	1,00	0,90
95	95,00	47,50	31,67	23,75	19,00	15,83	13,57	11,87	10,55	9,50	4,75	3,17	2,37	1,90	1,58	1,26	1,19	1,05	0.95
100	100,00	50,00	33,33	25,00	20,00	16,67	14,28	12,50	11,11	10,00	5,00	3,33	2,50	2,00	1,67	1,43	1,25	1,11	1,00

Digitized by Google

Le spécimen que nous donnons suffit pour indiquer la méthode à suivre. Comme les valeurs de e et de r varient beaucoup avec le genre de pile qu'on emploie, il faut calculer pour chaque genre de pile la Table qui lui convient. Nous dirons bientôt comment on mesure e et r.

Nous savons, d'après le problème qui précède, que toute autre combinaison des 48 éléments de notre exemple donne une intensité plus faible que celle qui était demandée. Le Tableau nous montre qu'il n'y a, pour obtenir l'intensité donnée, aucune autre combinaison d'éléments possible, dans laquelle la résistance de la pile soit égale à celle qui est proposée. On ne peut, en dehors de la combinaison indiquée, obtenir un courant d'intensité 0,096, traversant la résistance 0,75, qu'en employant un nombre plus grand d'éléments et en introduisant une résistance auxiliaire R'. La solution que nous avons donnée est la plus avantageuse.

Cette solution n'est d'ailleurs applicable qu'aux intensités supérieures à $\frac{e}{r+1}$, à savoir 0,012 dans l'exemple cité.

Pour les intensités inférieures à cette valeur, on ne peut plus réaliser la condition du maximum $nr = m\mathrm{R}$, et il faut disposer la pile en une seule série de n éléments. Dès lors, on doit avoir

$$\mathrm{I} = \frac{ne}{nr + \mathrm{R}}.$$

Cette équation ne peut pas, en général, être satisfaite par une valeur entière de n. Voici alors comment on fera. On résout l'équation par rapport à n :

$$n = \frac{\mathrm{IR}}{e - \mathrm{I}r}. \tag{25}$$

Généralement, on ne trouvera pas une valeur entière pour n. On prendra le nombre entier immédiatement supérieur au nombre fractionnaire trouvé, puis on calculera la résistance auxiliaire R' qui satisfasse à l'équation

$$\mathrm{I} = \frac{ne}{nr + \mathrm{R} + \mathrm{R}'}, \tag{26}$$

Digitized by Google

à savoir

$$R' = \frac{ne - I(nr + R)}{I}. \tag{27}$$

On aura la solution la plus simple possible avec les éléments de pile qui sont donnés.

Exemple numérique. — On veut avoir $I = 0,007$ avec $R = 6$ et quelques-uns des éléments de Bunsen de l'exemple précédent, pour lesquels $e = 0,024$ et $r = 1$. On trouve

$$\frac{IR}{e - Ir} = 2,47.$$

On prendra donc $n = 3$; par suite,

$$R' = 1,28.$$

C'est la résistance auxiliaire qu'il faut introduire dans le circuit. La Table IX contient les valeurs de I qui correspondent à diverses valeurs de n et de R. Elle peut servir au calcul de n, pour les intensités inférieures à 0,012 et pour les résistances supérieures à certaines valeurs qui dépendent des intensités.

Si l'on donne une résistance R plus petite que celles qui sont contenues dans la Table IX, pour cette résistance la valeur de n tirée de l'équation (25) est fractionnaire. Cela indique qu'on doit prendre un seul élément de pile et introduire dans le circuit une résistance auxiliaire R′ calculée par la formule (27), où l'on fera $n = 1$.

Pour se servir de cette Table, on cherche d'abord dans la première colonne verticale la valeur de R donnée, soit 6, comme dans l'exemple précédent. On suit la ligne horizontale jusqu'à ce qu'on ait trouvé le nombre 0,0080 immédiatement supérieur à l'intensité donnée 0,0070. Le nombre inscrit au sommet de la colonne verticale à laquelle on est arrivé est celui des éléments de la pile; on retrouve 3, comme dans le calcul ci-dessus.

Nous ne donnons cette Table que comme spécimen. Il est aisé d'en construire une semblable pour une pile quelconque et pour des résistances variant par degrés aussi rapprochés qu'on le voudra.

Digitized by Google

TABLE IX.

Valeurs de $I = \frac{ne}{nr + R}$ $(e = 0{,}024,\ r = 1)$.

R.	n.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,0120	0,0160	0,0180	0,0192	0,0200	0,0205	0,0210	0,0213	0,0216	0,0218
2	0,0080	0,0120	0,0144	0,0160	0,0171	0,0180	0,0187	0,0192	0,0196	0,0200
3	0,0060	0,0096	0,0120	0,0137	0,0150	0,0160	0,0168	0,0175	0,0180	0,0184
4	0,0024	0,0080	0,0103	0,0120	0,0133	0,0144	0,0153	0,0160	0,0166	0,0171
5	0,0020	0,0068	0,0090	0,0106	0,0120	0,0131	0,0140	0,0148	0,0154	0,0160
6	0,0017	0,0060	0,0080	0,0096	0,0109	0,0120	0,0129	0,0137	0,0144	0,0150
7	0,0015	0,0053	0,0072	0,0087	0,0100	0,0111	0,0120	0,0128	0,0135	0,0141
8	0,0013	0,0048	0,0066	0,0080	0,0093	0,0103	0,0112	0,0120	0,0127	0,0133
9	0,0012	0,0044	0,0060	0,0074	0,0086	0,0096	0,0105	0,0113	0,0120	0,0126
10	0,0011	0,0040	0,0055	0,0068	0,0080	0,0090	0,0099	0,0107	0,0114	0,0120

Commutateur de M. Lequesne. — Le but de cet appareil est de rassembler de toutes les manières possibles $n \times m$ éléments semblables par le déplacement d'une seule bascule. Supposons, par exemple, que l'on ait 6 éléments. Les combinaisons possibles sont :

1° $m = 1$, $n = 6$, série unique, pour les effets de tension;

2° $m = 2$, $n = 3$, deux séries parallèles, représentant 3 éléments de surface double;

3° $m = 3$, $n = 2$, trois séries parallèles, représentant 2 éléments de surface triple;

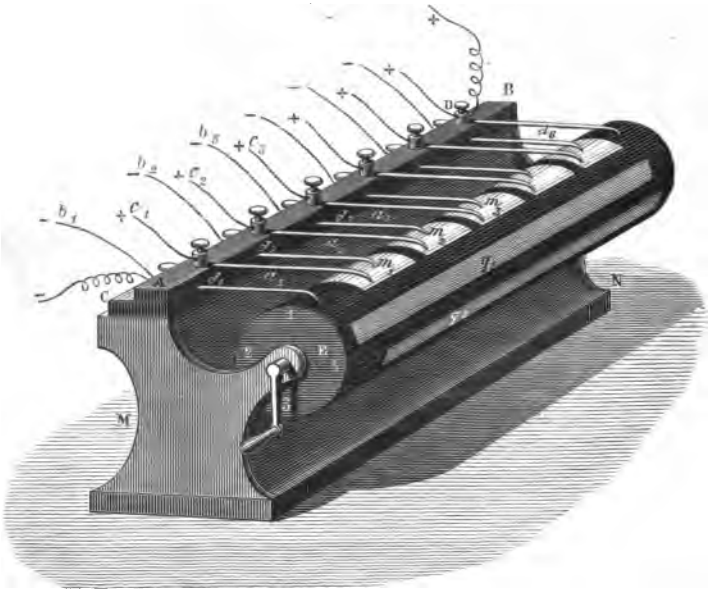
4° $m = 6$, $n = 1$, 1 élément de surface sextuple, pour les effets de quantité.

Voici le principe du commutateur destiné à cette manœuvre (*fig.* 12). Sur un bâti en fonte MN sont disposées deux plaques de caoutchouc durci AB, CD, portant chacune une série de bornes auxquelles sont soudées des languettes de cuivre a_1, a_2, a_3, ... et d_1, d_2, d_3, ... et sont attachés des fils métalliques c_1, c_2, c_3, ..., b_1, b_2, b_3, ... qui communiquent res-

Digitized by Google

pectivement avec les pôles des éléments de la pile. De cette manière, les pôles positifs des éléments sont sur les languettes isolées supérieures a_1, a_2, a_3, ..., et les pôles négatifs sont sur les languettes inférieures aussi isolées d_1, d_2, d_3, . . .

Fig. 12.



Pour obtenir la combinaison 1, il faut faire communiquer a_1 et d_2, a_2 et d_3, ..., et adapter les rhéophores extérieurs aux bornes extrêmes d_1 et a_6. A cet effet, un cylindre de bois EF peut tourner autour de son axe, qui est parallèle à la direction des plaques AB, CD. Sur la surface de ce cylindre sont fixées des lames de cuivre équidistantes m_1, m_2, m_3, ... En faisant tourner le cylindre, on les amène sous les extrémités recourbées des languettes a_1, a_2, ..., d_1, d_2, ..., comme on le voit sur la figure, et les communications se trouvent établies.

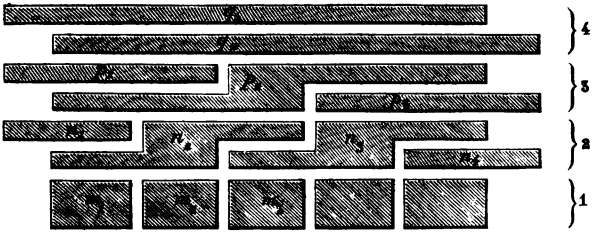
D'autres systèmes de lames de cuivre convenablement découpées, comme on le voit sur la *fig.* 13, sont fixées au cylyndre EF et doivent être amenées sous les languettes pour réaliser les autres arrangements. Cette figure est le développe-

Digitized by Google

ment dans un plan de toute la surface du cylindre, et les parties ombrées représentent les lames découpées.

Pour avoir la combinaison 2, on amène le système n_1, n_2, n_3, n_4 sous les languettes. La lame n_1 fait communiquer d_1 et d_2,

Fig. 13.



c'est-à-dire les pôles négatifs des deux premiers éléments. La lame n_2 fait communiquer les pôles positifs des mêmes éléments avec les pôles négatifs des deux éléments suivants. De même, la lame n_3 fait communiquer les pôles positifs de ces éléments avec les négatifs des deux suivants. Enfin les deux derniers pôles positifs sont réunis par la lame n_4. Les bornes extrêmes B et C portent toujours les rhéophores du circuit extérieurs.

La combinaison 3 sera réalisée par le système p_1, p_2, p_3, et enfin la combinaison 4 par le système q_1, q_2. On voit ces deux lames en avant sur le cylindre dans la *fig.* 12, et l'on comprend immédiatement qu'en tournant ce cylindre en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre on amènera q_1 au-dessous des languettes d_1, d_2, d_3, ..., ce qui réunira tous les pôles négatifs, et q_2 au-dessous de a_1, a_2, a_3, ..., ce qui réunira tous les pôles positifs.

Cette description fait connaître le principe de ce commutateur. On en a construit qui peuvent servir à 24 éléments et donner huit combinaisons qui correspondent à $n \times m = 24$. On trouve une description et un dessin d'un commutateur pour 12 éléments dans l'*Exposé des applications de l'électricité*, par M. du Moncel.

Digitized by Google

§ VI. — Lois générales relatives aux effets des courants électriques.

Un circuit voltaïque est le lieu de divers phénomènes dont la corrélation est aujourd'hui bien établie, grâce aux travaux des physiciens modernes, parmi lesquels se rangent au premier rang Faraday et Joule. Sans vouloir entreprendre le développement de cette corrélation, ce qui n'entre pas dans le cadre d'un Ouvrage essentiellement technique, nous croyons devoir esquisser sommairement les faits les plus importants, dont la connaissance nous paraît utile à ceux qui se servent de piles.

La pile est le lieu de combinaisons chimiques qui créent de la chaleur. Par exemple, dans une pile de Volta chargée avec l'acide sulfurique étendu, le zinc, qui constitue la partie négative de l'élément, décompose l'eau, prend l'oxygène pour former l'oxyde de zinc et met le gaz hydrogène en liberté. L'oxyde de zinc enfin se combine avec l'acide sulfurique et forme le sulfate de zinc, sel qui reste dissous tant qu'il ne se trouve pas produit en trop grande quantité.

L'ensemble de ces opérations produit de la chaleur. Cette chaleur est distribuée dans les diverses parties du circuit par une force particulière dont la cause s'appelle le *courant électrique*. La loi de Joule fait connaître le mode de distribution de cette chaleur. D'après cette loi, la quantité totale de chaleur créée dans l'unité de temps est *proportionnelle au carré de l'intensité* du courant; en outre, cette chaleur se partage comme il suit entre les diverses parties du circuit.

Considérons le cas le plus simple, celui où le conducteur qui réunit les pôles de la pile est formé de parties conductrices fixes, telles que des fils de métal ou des colonnes de mercure. La chaleur créée dans la pile est distribuée dans chaque portion du circuit, y compris la pile, *proportionnellement à la résistance* de cette portion. Ainsi, lorsque la résistance du conducteur extrapolaire est égale à celle de la pile, à sa moitié,

Digitized by Google

à son tiers, etc., la chaleur qui apparaît dans ce conducteur est aussi égale à celle de la pile, à sa moitié, à son tiers, etc.

La chaleur totale d'un circuit où il ne se produit pas de décomposition chimique est toujours la même pour le même poids de zinc dissous dans la pile. Elle sert de mesure à la quantité de *travail chimique* qui s'accomplit.

Lorsqu'il y a des liquides composés, tels que des solutions salines, interposés dans le circuit, la chaleur totale du circuit n'est plus égale à celle qui a été engendrée dans la pile.

Interposons par exemple un voltamètre à eau dans le circuit; la décomposition de l'eau s'y produit; c'est une opération de sens contraire à celui de la combinaison effectuée sur le zinc : aussi dit-on qu'elle constitue un *travail résistant* et appelle-t-on *travail moteur* celui qui représente la combinaison opérée dans la pile.

Le déficit de chaleur qui accompagne l'électrolyse est proportionnel au travail résistant dont il s'agit; il est égal à la quantité de chaleur nécessaire pour produire la décomposition chimique. Dans ce cas, le travail moteur de la pile est représenté dans le circuit en partie sous forme de chaleur, en partie sous forme de *travail chimique d'électrolyse*. La somme de ces deux parties est l'effet de l'action chimique opérée dans la pile.

Entre les quantités de matière combinées dans la pile et celles qui sont décomposées dans les électrolytes il y a la relation découverte par Faraday :

Les quantités de matière combinées dans chaque couple de la pile et celles qui sont décomposées dans chaque électrolyte sont proportionnelles aux équivalents chimiques des substances respectivement combinées et décomposées.

En réunissant les lois de Joule et de Faraday, on se rend compte de la quantité des effets chimiques et calorifiques accomplis dans un circuit.

Exemple. — Un circuit est formé par une pile de Volta de 20 éléments et deux fils de métal partant des pôles et aboutis-

Digitized by Google

sant respectivement aux fils de platine d'un voltamètre à eau.

Lorsque 100^{gr} de zinc ont été dissous dans la pile, il y aura eu 56 unités de chaleur ou *calories* (1) créées. Chaque couple aura fourni 5^{gr} de zinc. Il y aura $1^{gr},364$ d'eau décomposée dans le voltamètre. La décomposition de cette eau exige la dépense de $5^{cal},3$ environ; on en trouvera $56 - 5,3 = 50,7$ dans le reste du circuit.

Lorsque la pile sert à mettre en mouvement un moteur électrique, tel qu'une machine électro-magnétique, l'effet utile du courant est un *travail mécanique* qu'on peut mesurer à l'aide du *frein* et qu'on évalue en *kilogrammètres*. Dans ce cas, il y a dans tout le circuit un déficit de chaleur proportionnel au travail produit. La chaleur du circuit total est moindre que celle qui correspond à l'action chimique accomplie dans la pile, et c'est la différence de ces deux quantités de chaleur qui forme le déficit. On dit que la chaleur disparue est *convertie* en travail mécanique. Le rapport de conversion est 425 lorsqu'on prend pour unité de chaleur celle qui est capable d'élever de 1° la température de 1^{kg} d'eau prise à 0° et pour unité de travail l'élévation de 1^{kg} à une hauteur de 1^{m}.

Ainsi supposons, dans l'exemple numérique qui précède, que la pile de 20 éléments soit employée à élever un poids à l'aide d'un électro-moteur. Lorsque ce travail aura été de $425 \times 10 = 4250^{kgm}$, 10^{cal} auront disparu dans tout le circuit. S'il n'y a pas de voltamètre ni d'électrolyte, sur les 56^{cal} créées par la combinaison de 100^{gr} de zinc, on en retrouvera $56 - 10 = 46$, qui seront distribuées entre la pile et les conducteurs suivant la loi de Joule.

Les trois sortes d'effets dont nous venons de parler, à savoir les effets calorifiques (éclairage électrique), les effets chimiques (galvanoplastie), les effets mécaniques (moteurs électro-magnétiques), sont les principaux que l'on rencontre dans

(1) L'*unité de chaleur* ou *calorie* est la chaleur qu'on dépense pour élever de 1° C. la température de 1^{kg} d'eau prise à la température de la glace fondante.

Digitized by Google

les applications industrielles. Les autres genres d'effets sont soumis à des lois semblables.

Il y a une analogie très grande entre une machine à vapeur et une pile voltaïque au point de vue de l'emploi de la chaleur, qui est dans les deux cas la source de l'effet produit.

Dans une machine à vapeur en activité, il y a création de chaleur dans le foyer. Une partie de cette chaleur est simplement transmise aux corps environnants et sert à les échauffer (parois du fourneau, air atmosphérique, parties solides en contact avec la vapeur, et surtout eau froide injectée dans le condenseur); mais il y en a une autre partie qui fait déficit, qu'on ne retrouve nulle part. Elle est convertie en travail mécanique; c'est ce travail qui est le but à atteindre, et la meilleure machine est celle qui produit le plus grand travail possible en consommant un poids donné de charbon. Les efforts des constructeurs doivent tendre à se rapprocher le plus possible du maximum de travail, lequel est indiqué par la *Théorie mécanique de la chaleur*.

Une pile voltaïque animant un moteur électro-magnétique présente des phénomènes semblables.

Le zinc consommé dans la pile correspond au charbon brûlé sur la grille de la machine à vapeur. Les diverses pièces du circuit et les corps voisins s'échauffent aux dépens de la pile; une partie seulement de la chaleur créée dans la pile est convertie en travail dans le moteur électro-magnétique. Il y a un maximum de travail possible pour un poids de zinc donné, et les efforts des constructeurs doivent tendre à se rapprocher de ce maximum.

L'analogie des deux systèmes de machines est si grande, que les formules qui représentent le maximum de travail possible sont semblables.

Machine à vapeur. — Appelons t la température développée dans le foyer et t' celle qui est maintenue dans le condenseur par l'injection d'eau froide. En ajoutant à ces nombres exprimés en degrés centigrades le nombre 273, on obtient les tem-

Digitized by Google

pératures dites absolues

$$T = 273 + t,$$
$$T' = 273 + t'.$$

Dès lors le maximum de chaleur qu'il est théoriquement possible de convertir en travail pour chaque calorie créée dans le foyer est donné par la formule

$$C = \frac{T - T'}{T}. \tag{28}$$

On l'appelle *coefficient économique* théorique de la machine.

Machine électro-magnétique. — Appelons E la force électro-motrice totale de la pile lorsque le circuit est fermé et que la machine est au repos, I l'intensité du courant, R la résistance totale.

Supposons que, la pile étant supprimée, on la remplace par un fil de même résistance et qu'on mette la machine électro-magnétique en mouvement en dépensant une certaine quantité de travail mécanique. On engendrera un courant inverse du courant de la pile primitive (loi de Lenz).

Appelons I′ son intensité, toujours inférieure à I. Les choses se passent comme s'il y avait dans le circuit une pile inverse ayant pour force électro-motrice E′.

La formule de Ohm donne

$$I = \frac{E}{R}, \quad I' = \frac{E'}{R}.$$

Les forces électro-motrices E et E′, qui ont leurs sièges respectivement dans la pile et dans le moteur électro-magnétique, jouent le rôle des températures T et T′, qui ont leurs sièges respectivement dans le foyer et dans le condenseur d'une machine à vapeur, de sorte que le *coefficient économique* théorique pour des valeurs données de I et de I′ est

$$C = \frac{E - E'}{E} = \frac{I - I'}{I}. \tag{29}$$

Il faut remarquer que les valeurs de E′ et de I′, dont il est

Digitized by Google

question ici, dépendent de la rapidité du mouvement du moteur électro-magnétique, de sorte que l'étude complète de ce genre de moteur exige des connaissances spéciales qui ne sauraient entrer dans le cadre de cet Ouvrage. Nous dirons seulement que, d'après Jacobi, le coefficient maximum pour une machine ordinaire est $\frac{1}{2}$, de sorte que $I' = \frac{I}{2}$.

Ces exemples suffisent pour montrer le rôle d'une pile voltaïque. La dépense du zinc ou de toute autre substance analogue, qui entre en combinaison chimique, est la source de l'*énergie* qui s'emploie dans le circuit à divers effets. Les effets calorifiques sont une conversion d'énergie chimique en chaleur; les effets chimiques sont un transport d'énergie chimique, sans changement de forme; enfin les effets mécaniques sont une conversion d'énergie chimique en travail mécanique. Dans le cas le plus général, les trois sortes d'effets s'accomplissent dans le circuit, et leur ensemble représente une quantité totale d'énergie égale à celle qui a été développée dans la pile.

§ VII. — Application des lois précédentes a divers problèmes.

Problème I. — *On veut produire q calories pendant l'unité de temps dans le conducteur d'une pile, ce conducteur ayant la résistance* R, *et l'on doit faire usage d'une pile dont chaque élément a une force électro-motrice e et une résistance r : combien d'éléments faut-il employer et comment doit-on les assembler ?*

Appelons x le nombre des éléments réunis en surface, c'est-à-dire par leurs pôles semblables, et y le nombre des files d'éléments ainsi rassemblés, files qui sont réunies entre elles par leurs pôles différents. Nous constituons ainsi une pile de y grands éléments, ayant chacun une surface x fois plus grande que celle d'un des éléments donnés, ou, comme on dit encore, une pile de x séries parallèles, dont chacune est composée de y éléments.

Digitized by Google

Appelons z l'intensité maxima du courant de cette pile, laquelle a lieu, comme il a été dit, lorsque la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure.

La résistance intérieure est $y \times \frac{r}{x}$; la résistance extérieure est R, valeur donnée : la résistance totale qui convient à l'intensité maxima z est donc 2R.

La force électro-motrice de chaque file d'éléments rassemblés par les pôles semblables est e, comme pour un seul élément. La force électro-motrice totale des y files sera ye. La loi de Ohm donne

$$z = \frac{ye}{2R}. \tag{30}$$

Appelons C la quantité de chaleur produite par la combinaison de $0^{gr},001$ de zinc dans chaque file de x éléments jouant le rôle d'un élément simple de grande surface dans la pile composée qu'on va établir.

Avec un courant d'intensité 1, il y aurait dans chaque file $0^{gr},033$ de zinc combinés par seconde, et dans la pile totale, réunion de y files semblables, $33 \times y$ milligrammes de zinc dans le même temps. La chaleur produite serait donc

$$33 \times y \times C.$$

Avec le courant d'intensité z, la chaleur produite en une seconde sera, d'après la loi de Joule, $33 \times y \times C \times z^2$ pour tout le circuit. Dans la portion extérieure du circuit, nous voulons, d'après l'énoncé du problème, produire q calories. La loi de distribution de la chaleur dans le circuit nous fournit la relation

$$33 \times y \times C \times z^2 = 2q. \tag{31}$$

Éliminons z entre ces deux équations ; il viendra

$$y = \sqrt[3]{\frac{8qR^2}{33 \times C \times e^2}}. \tag{32}$$

Tel est le nombre d'éléments qu'il faut réunir par les pôles différents pour former chacune des séries parallèles.

Digitized by Google

Pour calculer x, il suffit de rappeler que, en égalant la résistance extérieure R, qui est donnée, à la résistance intérieure, on a

$$R = y\frac{r}{x},$$

d'où

$$x = y\frac{r}{R}. \tag{33}$$

Enfin, ayant calculé x et y, le produit xy indiquera le nombre total d'éléments simples qu'il faut employer.

Pour résoudre ce problème, il faut connaître la valeur de C, chaleur produite par la combinaison de $0^{gr},001$ de zinc, dans les piles usuelles.

Cette valeur est donnée par le Tableau suivant :

Élément de	Wollaston....	0,0188
»	Daniell.....	0,0237
»	Grove.....	0,0464

Problème II. — *On veut décomposer une solution saline et déposer sur l'électrode négative un poids* P *de métal pendant l'unité de temps; la résistance extérieure totale* R *est donnée, et l'on doit faire usage d'éléments ayant chacun la force électro-motrice e et la résistance r. Combien d'éléments faut-il employer et comment faut-il les assembler?*

Ce problème est analogue au précédent. En employant les mêmes notations, on a, pour l'intensité que fournit la disposition la plus avantageuse de la pile,

$$z = \frac{re}{2R}. \tag{34}$$

Appelons M l'équivalent chimique en poids du métal de la solution par rapport à l'hydrogène. D'après la loi de Faraday, un courant capable de dégager $0^{gr},001$ d'hydrogène par seconde, en décomposant l'eau, décomposera le sel donné en déposant M milligrammes de métal par seconde. Si l'intensité est z, le

Digitized by Google

poids de métal déposé sera, d'après l'énoncé du problème,

$$Mz = P. \tag{35}$$

Éliminons z entre ces deux équations ; il vient

$$y = \frac{2PR}{Me}. \tag{36}$$

On achèvera la solution du problème comme pour le précédent; on trouvera ainsi

$$x = y\frac{r}{R} = \frac{2Pr}{Me}, \tag{37}$$

et le nombre total des éléments sera

$$xy = \frac{4P^2Rr}{M^2e^2}. \tag{38}$$

Le Tableau suivant donne, pour les métaux usuels, les valeurs de M, équivalents en poids rapportés à l'hydrogène.

Cuivre.....	Cu =	32
Argent.....	Ag =	108
Or.....	Au =	98,2
Platine.....	Pt =	98,5
Plomb.....	Pb =	103,5
Fer.....	Fe =	28
Nickel.....	Ni =	29,5
Zinc.....	Zn =	32,75
Étain.....	Sn =	59
Mercure.....	Hg =	100
Aluminium.....	Al =	13,75

Problème III. — *On veut produire le travail maximum d'une machine électro-magnétique dont la force effective est* F *chevaux-vapeur* (1) *et dont le rendement pratique est* K; *la résistance* R *de la machine est donnée, et l'on fait usage d'éléments voltaïques ayant chacun la force électro-*

(1) Un *cheval-vapeur* est le travail de 75^{kgm} par seconde.

Digitized by Google

motrice e et la résistance r. Combien faut-il d'éléments et comment doit-on les disposer?

Évaluons d'abord le travail réel T de la machine en activité. La force effective étant F, on a sur l'arbre de la machine une force disponible F′, de sorte que le rendement est

$$K = \frac{F}{F'}.$$

Le travail total, travail utile et travail consommé par les frottements et les résistances passives, est donc, par seconde,

$$T = F' \times 75 = \frac{F \times 75}{K}. \tag{39}$$

C'est ce travail que notre pile doit produire à l'aide de la machine électro-magnétique donnée.

Supposons le circuit de cette pile fermé par le fil conducteur de la machine; la disposition la plus avantageuse est celle où la résistance de ce fil R est égale à celle de la pile, et nous avons vu que, dans ce cas, l'intensité du courant qui passe dans le système au repos est, avec nos notations précédentes,

$$z = \frac{re}{2R}. \tag{40}$$

Nous tirerons la seconde équation, dont nous avons besoin, de la condition donnée, à savoir : le travail de la machine est *maximum*.

D'après Jacobi, cette condition est satisfaite lorsque la vitesse de rotation de la machine réduit l'intensité du courant à la moitié de sa valeur au repos, par conséquent à la valeur $\frac{z}{2}$; de plus, le *coefficient économique* est alors $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire la moitié de la chaleur créée dans la pile est convertie en travail mécanique employé dans la machine motrice.

L'intensité du courant pendant la rotation de la machine étant $\frac{z}{2}$, la chaleur produite par la combinaison du zinc dans la pile en une seconde est, comme on l'a vu plus haut,

Digitized by Google

$33 \times y \times C \frac{z^2}{4}$, et la moitié équivaut au travail T. Comme l'équivalent mécanique de 1^{cal} est 425^{kgm}, on a l'équation cherchée

$$(41) \qquad \frac{T}{425} = \frac{1}{8} 33 y z^2 C.$$

On tire des équations (40) et (41), en éliminant z,

$$y = \sqrt[3]{\frac{32 TR^2}{425 \times 33 \times Ce^2}}$$

ou

$$(42) \qquad y = \sqrt[3]{\frac{32 \times 75 \times FR^2}{425 \times 33 \times Ce^2 K}}.$$

Ayant y, on achèvera le problème, comme les deux précédents,

$$x = y \frac{r}{R}$$

(nombre total d'éléments, $x \times y$).

Remarque. — La solution que nous venons de donner n'est qu'approximative. Les phénomènes qui s'accomplissent dans les électro-aimants sont très complexes et leurs lois ne sont pas suffisamment connues.

Observations sur les trois problèmes précédents. — D'après les valeurs numériques qu'on peut rencontrer pour les données, il arrivera généralement que l'on trouvera pour y et x des valeurs fractionnaires. Il est évident que, dans ce cas, il faut prendre le premier nombre entier qui vient au-dessus de la valeur trouvée. Cela modifiera un peu l'effet produit par le courant, mais en l'augmentant; il suffira, par conséquent, d'introduire dans le circuit une résistance facile à calculer pour rétablir exactement ce qui est demandé.

Les formules données supposent que la pile a des éléments où entre le zinc comme élément négatif. Les coefficients 33 et C sont ceux qui se rapportent à ce métal. Avec tout autre métal on aurait, au lieu de 33, l'équivalent chimique de ce métal, rapporté à l'hydrogène, et pour C une chaleur de combinaison particulière que l'expérience ferait connaître.

Digitized by Google

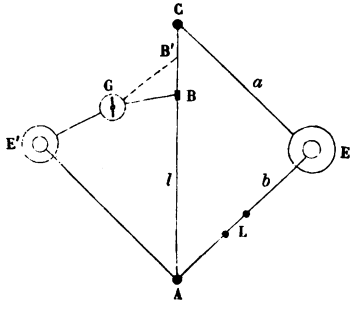
§ VIII. — Détermination des constantes d'une pile.

La puissance d'un élément de pile est déterminée par deux quantités, sa *force électro-motrice* et sa *résistance*. Ce sont les quantités désignées par e et x dans les formules précédentes et que l'on appelle communément les *constantes* de la pile.

Nous indiquerons les procédés qui nous paraissent les meilleurs au point de vue de l'exactitude et de la simplicité pour déterminer ces deux quantités.

Force électro-motrice relative et résistance. — M. Poggendorff a imaginé, en 1841, une méthode, dite *de compensation*, qui permet de trouver le rapport des forces électro-motrices de deux piles. Elle a été modifiée ensuite par MM. Bosscha, du Bois-Reymond, Paalzow, etc. Voici la disposition que nous pensons devoir recommander (*fig.* 14).

Fig. 14.



Un fil de platine AC est tendu en ligne droite. L'extrémité A communique, à l'aide d'un godet de mercure, avec le pôle positif de la pile E′ que l'on étudie et avec le pôle positif d'une pile E qui sert de terme de comparaison, et qui doit avoir une force électro-motrice plus grande que celle de l'autre. On réalisera cette condition en prenant un nombre d'éléments suffisant. En outre, cette pile ne doit pas avoir de polarisation. On

Digitized by Google

pourra prendre une pile de Daniell. L'autre bout du fil C communique par un godet de mercure avec le pôle négatif de la pile E. Enfin, un conducteur relie le pôle négatif de la pile E′ à un galvanomètre ordinaire G, et un fil partant de ce galvanomètre vient aboutir en B au fil rectiligne AC, par l'intermédiaire d'un bouchon creux qu'on peut faire glisser le long de AC et qui contient du mercure pour établir la communication. Le fil AC est tendu le long d'une règle divisée, afin qu'on puisse mesurer la longueur AB. Sur le conducteur AE se trouvent deux godets de mercure réunis par un gros fil de cuivre, dont la résistance est négligeable. On peut, à volonté, remplacer ce gros fil par un fil semblable au fil AC et de longueur L.

On commence par établir sur le côté AE le gros fil, et l'on fait glisser le bout du fil B le long de AC jusqu'à ce que le galvanomètre G revienne au zéro. On mesure la longueur AB $= l$. Cela fait, on intercale sur AE le fil fin de résistance L et on change la position de B en l'écartant de A jusqu'à ce que le galvanomètre soit de nouveau au zéro. On mesure la longueur AB′ $= l'$. La force électro-motrice de la pile E′ par rapport à E est donnée par la formule

$$\frac{E'}{E} = \frac{l' - l}{L}. \tag{43}$$

Si l'on suppose que les conducteurs AE, CE soient formés du même fil que AC et aient les longueurs A et B, la pile E a une résistance équivalente à celle de la longueur

$$\frac{lL}{l' - l} - l - a - b$$

du même fil. En appelant c la résistance de l'unité de longueur de ce fil, la résistance R de la pile E sera donnée par l'équation

$$R = c\left(\frac{lL}{l' - l} - l - a - b\right). \tag{44}$$

Il importe de remarquer que la valeur de $\frac{E'}{E}$ que nous venons de considérer se rapporte à la pile E′ ouverte, car la disposition de l'appareil est telle, qu'aucun courant n'a lieu dans

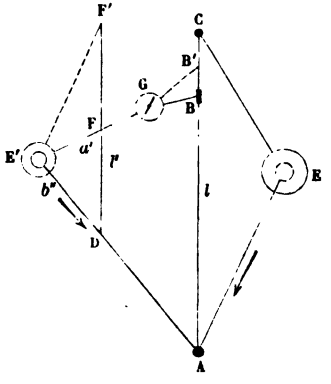
Digitized by Google

les conducteurs AE′, BE′. L'état de la pile E′ est le même que si son circuit était ouvert.

Une modification très simple de l'appareil permettra de mesurer la force électro-motrice relative des deux éléments lorsque l'un et l'autre ont leur circuit fermé, et aussi la résistance R′ de l'élément E′, que ne donne pas l'expérience précédente.

Pour cela, on dispose (*fig.* 15) un second fil DFF′ semblable

Fig. 15.



à AC, et on le fait passer à travers un bouchon de liège F contenant du mercure et fixé au milieu du fil. En D et F′ sont des godets de mercure pour établir les communications.

On commence par plonger le rhéophore négatif de la pile E′ dans le godet F, et on règle la position de B de façon que le galvanomètre G soit au zéro. On mesure $AB'' = l''$, puis on porte le rhéophore de F en F′ et on règle de nouveau la position de B pour maintenir le galvanomètre au zéro. On mesure la nouvelle distance $AB''' = l'''$.

La force électro-motrice relative est

$$\frac{E''}{E} = \frac{l'' l'''}{l(l'' - l''')}. \tag{45}$$

Si la pile E′ n'a pas de polarisation, on trouve la valeur $\frac{E'}{E}$ donnée ci-dessus.

Digitized by Google

Sinon, la force de polarisation relative est

$$\frac{E'}{E} - \frac{E''}{E} = \frac{f}{E}. \tag{46}$$

Si les conducteurs DE′, FE′ sont des fils semblables à ceux du reste du circuit, on aura la résistance de la pile E′ par la formule

$$R' = \frac{L'(2l''' - l'')}{l'' - l'''} - a' - b', \tag{47}$$

L′ étant la longueur DF, a' celle du conducteur FE′ et b' celle du conducteur DE′.

On exprimera R′ en unités de résistance, connaissant le diamètre des fils employés dans l'expérience et leur coefficient de conductibilité.

Force électro-motrice absolue. — Il reste à faire une fois pour toutes une détermination absolue sur la pile de comparaison. Quand on connaîtra E, on n'aura plus qu'à multiplier cette valeur par les rapports $\frac{E'}{E}$, $\frac{E''}{E}$, trouvés précédemment pour avoir E′ et E″.

Supposons que l'expérience précédente ait été faite avec n éléments de Daniell composant la pile E.

Nous avons trouvé une résistance totale R; par suite, la résistance d'un seul élément est $\frac{R}{n} = r$.

Si l'on appelle e la force électro-motrice d'un seul élément, on aura $E = ne$. Nous allons déterminer e par expérience.

On se servira d'une boussole des tangentes ou d'un galvanomètre quelconque qu'on aura comparé au voltamètre, de manière qu'on sache l'intensité qui correspond à chaque degré de l'instrument. On devra aussi mesurer, à l'aide d'un rhéostat, la résistance du fil de ce galvanomètre. Soit R_1 cette résistance évaluée en mercure. On formera un circuit avec l'élément Daniell, le galvanomètre et deux rhéophores de résistances connues R_2 et R_3, et l'on observera la déviation. On en déduira

Digitized by Google

l'intensité absolue I. Dès lors l'équation

$$I = \frac{e}{r + R_1 + R_2 + R_3}$$

donnera la force électro-motrice cherchée :

$$(48) \qquad e = I(r + R_1 + R_2 + R_3).$$

Il sera bon d'opérer plusieurs mesures en changeant R_2 et R_3 et de prendre la moyenne des valeurs de e.

On pourra aussi, en groupant les équations deux par deux, calculer r et comparer comme vérification la valeur ainsi obtenue à celle qu'on déduit de la formule (44) à l'aide de $r = \frac{R}{n}$.

Calcul des formules précédentes. — On s'appuie sur les deux propositions suivantes, dues à M. Kirchhoff, lesquelles sont des conséquences de la formule de Ohm.

1° Lorsque plusieurs conducteurs aboutissent à un même point, la somme algébrique des intensités des courants qui traversent ces conducteurs est nulle. On prendra positivement les intensités des courants qui sont dirigés vers ce point et négativement celles des courants qui partent de ce point.

2° Dans un circuit fermé, la somme algébrique des produits de la résistance de chaque conducteur par l'intensité du courant qui le traverse est égale à la somme algébrique des forces électro-motrices des éléments compris dans le circuit. On prendra positivement les forces électro-motrices qui agissent dans le sens du courant et négativement les autres.

Première expérience. — Circuit EABC (*fig.* 14), d'intensité i dans toutes ses parties [1] :

$$(49) \qquad i(l + a + R + b) = E.$$

L'intensité est nulle de B en E′ et de E′ en A, car, d'après le théorème I, on a au point A, en appelant x l'intensité en AE′

[1] Dans ce qui suit, on désigne par les lettres l, R, a, b, etc., non pas les longueurs des fils, mais leur résistance.

Digitized by Google

et i_1 l'intensité en AB,

$$i - i_1 + x = 0,$$

et au point B, puisque l'intensité est nulle en BE',

$$i - i_1 = 0,$$

d'où l'on conclut $x = 0$.

Circuit E'ABG ; d'après le théorème II,

$$li = E'. \tag{50}$$

On tire des équations (49) et (50)

$$\frac{E'}{E} = \frac{l}{l + a + R + b}. \tag{51}$$

Deuxième expérience. — La résistance L étant intercalée en AE, il suffit de remplacer dans la formule (50) l par l' et b par $b + L$ dans (49) :

$$\frac{E'}{E} = \frac{l'}{l + a + R + b + L}. \tag{52}$$

Des équations (51) et (52) on tire les formules (43) et (44).

Troisième expérience. — Pile E'' fermée (*fig.* 15) ; elle a la force électro-motrice E''.

Circuit EABC..... $i\,(l + a + R + b) = E$
Circuit E''DF..... $i'(R' + a' + b' + L') = E''$
Circuit ABFD..... $il'' - i'L' = 0$

On tire de ces équations

$$\frac{E''}{E} = \frac{l''(R' + a' + b' + L')}{(l + a + R + b)L'}. \tag{53}$$

Quatrième expérience.

Circuit EABC..... $i(l + a + R + b) = E$
Circuit E''DF'..... $i''(R' + a' + b' + 2L') = E''$
Circuit ABFD..... $il''' - i''2L' = 0$

D'où l'on tire

$$\frac{E''}{E} = \frac{l'''(R' + a' + b' + 2L')}{(l + a + R + b)L'}. \tag{54}$$

Digitized by Google

Des équations (53) et (54) on conclut, en y joignant la valeur de R, équation (44), les formules (45) et (47).

Il est à remarquer qu'on n'a pas besoin de connaître la résistance du galvanomètre ni celle des conducteurs AD, BF.

Lorsqu'on prendra une pile de Daniell pour la pile E, on n'aura à faire que les quatre expériences qui font connaître $\frac{E'}{E}$ et $\frac{E''}{E}$. Le même appareil servira, en supprimant le fil DF, pour les deux premières. On n'aura ensuite qu'à multiplier les rapports en question par la valeur de E. Cette valeur, d'après nos expériences, est

$$E(\text{Daniell}) = 0,0123.$$

Les constructeurs n'ont donc pas à se préoccuper de cette recherche particulière (1).

La méthode que nous venons de décrire s'applique à toute espèce de pile. Si la pile E' est une pile thermo-électrique, on assemblera un assez grand nombre d'éléments, afin d'avoir une résistance comparable à celle de la pile de comparaison E. Celle-ci devra avoir une résistance très faible, ce que l'on réalisera en lui donnant une très grande surface et rapprochant le plus possible le zinc du cuivre. La forme de la pile de Grove peut être recommandée; on y remplacera l'acide azotique par la solution de sulfate de cuivre et le platine par une lame de cuivre, et l'on donnera à l'auge rectangulaire la plus petite épaisseur possible.

Cas d'une pile sans polarisation. — Il y a un grand nombre de manières de déterminer la force électromotrice et la résistance d'une pile constante, sans polarisation. On part toujours de la formule de Ohm, et les calculs sont excessivement simples.

Comme exemple de ce genre de calculs, nous citerons les

(1) La valeur de la force électro-motrice de l'élément Daniell ne peut pas être considérée rigoureusement comme constante : elle varie avec la manière dont l'élément a été monté et son ancienneté. Pour des expériences précises, il faudra donc déterminer directement la valeur de E. A. A.

Digitized by Google

expériences suivantes, que nous avons effectuées pour déterminer la force électro-motrice absolue d'un élément de Bunsen à charbon intérieur et à auge rectangulaire.

1° *Détermination de la constante d'une boussole des tangentes.* — Le circuit est composé de 4 éléments, d'une boussole des tangentes et d'un voltamètre. On a observé

Déviation de la boussole.....	$\delta = 7°50'$	$\log \operatorname{tang} \delta = \bar{1},13854$
Vol. d'hydrogène dégagé en deux minutes...	$v = 17^{cc}$	
Hauteur barométrique réduite à 0°.....	$H_0 = 760^{mm}$	
Température.....	$t = 14°,5$	
Intensité calculée par la formule (1).....	$I = 0,011846$	$\log I = \bar{2},07358$
Formule de la boussole.....	$I = K \operatorname{tang} \delta$	$\log K = \bar{2},93504$
	$K = 0,08611$	

2° *Détermination de la force électro-motrice absolue d'un élément.*

(A) Circuit formé par $n = 4$ éléments, la boussole et les rhéophores nécessaires :

Déviation de la boussole.... $d = 27°4'$, $\log \operatorname{tang} d = \bar{1},70841$
$\operatorname{tang} d = 0,5110$

(B) Circuit formé par les mêmes éléments, la même boussole, les mêmes rhéophores, plus une résistance $R = 1,6748$ constituée par un tube capillaire plein de mercure :

Déviation..... $d' = 16°25'$ $\log \operatorname{tang} d' = \bar{1},46928$
$\operatorname{tang} d' = 0,2946$

Ces données servent à calculer e.

En effet on a, en appelant z la résistance des rhéophores et de la boussole,

$$K \operatorname{tang} d = \frac{ne}{nr + z} \quad \text{ou} \quad K(nr + z) \operatorname{tang} d = ne,$$

$$K \operatorname{tang} d' = \frac{ne}{nr + R + z} \quad \text{ou} \quad K(nr + z) \operatorname{tang} d' + KR \operatorname{tang} d' = ne.$$

Multipliant la première de ces équations par $\operatorname{tang} d'$ et la seconde par $\operatorname{tang} d$, et retranchant membre à membre, on a

$$KR \operatorname{tang} d \operatorname{tang} d' = ne(\operatorname{tang} d - \operatorname{tang} d'),$$

Digitized by Google

d'où

$$e = \frac{KR \tang d \tang d'}{n(\tang d - \tang d')}.$$

En effectuant les calculs, on trouve

$$e = 0,025.$$

On a répété plusieurs expériences de cette manière, en changeant le nombre des éléments et la résistance R. La moyenne de toutes ces expériences a donné $e = 0,024$, nombre qui concorde avec celui qu'on tire des expériences d'autres observateurs.

3° *Détermination de la résistance de l'élément.* — L'eau est acidulée à $\frac{1}{20}$ d'acide sulfurique.

Il suffit de combiner l'expérience (A) qui précède avec la suivante.

(C) Le circuit est disposé comme en (A), mais avec 2 éléments au lieu de 4 :

Déviation..... $16°34' = d''$, $\log \tang d'' = \bar{1},47346$
$\tang d'' = 0,2975$

On a, pour calculer r, les équations

$$K(nr + z) \tang d = ne,$$
$$K(n'r + z) \tang d'' = n'e.$$

Multipliant la première par $\tang d''$ et la seconde par $\tang d$, et retranchant membre à membre, on a

$$Kr(n - n') \tang d \tang d'' = e(n \tang d'' - n' \tang d),$$

d'où

$$r = \frac{e(n \tang d'' - n' \tang d)}{K(n - n') \tang d \tang d''}.$$

En faisant $n' = \frac{n}{2}$, on a

$$r = \frac{e(2 \tang d'' - \tang d)}{K \tang d \tang a''}.$$

Les nombres observés pour (A) et (C) donnent

$$r = 0,136.$$

Digitized by Google

Cette résistance est environ $\frac{1}{7}$ de celle d'un élément de Bunsen ordinaire cylindrique.

La méthode que nous venons de décrire se recommande par sa simplicité. Elle est moins précise que celle que nous avons décrite en premier lieu, et elle ne s'applique qu'aux piles constantes; mais elle est suffisante pour ce genre de piles lorsqu'on n'a besoin que d'une valeur approximative. Nous estimons que l'approximation est $\frac{1}{30}$. On peut aisément improviser une détermination de ce genre. Une boussole n'est même pas indispensable. Un voltamètre ordinaire peut suffire. Sa résistance est comprise dans la quantité z de nos formules. Quant à sa force de polarisation, elle est négligeable avec une pile de plusieurs éléments ayant les dimensions ordinaires.

La résistance connue R dont on a besoin est très facile à mesurer. On remplit de mercure un tube de verre capillaire ayant environ $0^m,0015$ de diamètre et 1^m de long, et l'on pèse ce mercure.

Soient

p le poids de ce mercure en milligrammes;
l la longueur du tube en millimètres;
d le poids spécifique du mercure $= 13,596$ à la température ordinaire;
s la section du tube.

On a

$$s = \frac{p}{ld}$$

en millimètres carrés ; par suite,

$$R = \frac{l}{1000\,s}. \tag{55}$$

Le tube est disposé horizontalement; ses extrémités sont enfoncées dans des bouchons de liège creusés en forme de godets. En versant du mercure dans l'un des godets, on remplit le tube et le second godet; les niveaux s'établissent sur un même plan horizontal, comme dans les vases communicants.

Digitized by Google

Il n'y a qu'à plonger dans les godets les rhéophores de la pile pour fermer le circuit.

(Nous croyons devoir ajouter ici, comme complément à ce qui précède, un procédé très commode et très employé aujourd'hui pour déterminer la résistance des piles.

La pile de résistance x et de force électromotrice E agit d'abord dans un circuit extérieur de résistance R, contenant un galvanomètre; l'intensité accusée par cet instrument étant I, on a

$$E = (R + x)I. \tag{56}$$

Sans rien changer à la disposition précédente, on réunit les deux pôles par un fil dont la résistance est S; le courant se partageant entre les circuits R et S, l'intensité devient I′ dans R et i dans S, et l'on a, d'après les formules de Kirchhoff,

$$I'R = is$$

et

$$E = (I' + i)x + I'R$$

ou

$$E = I'\left(R + x + \frac{Rx}{S}\right). \tag{57}$$

En combinant les équations (56) et (57), on obtient

$$\frac{I}{I'} = \frac{R + x + \frac{Rx}{S}}{R + x}$$

ou

$$\frac{I - I'}{I'} = \frac{x}{S}\,\frac{R}{R + x} = \frac{x}{S}\left[\frac{1}{1 + \frac{x}{R}}\right],$$

équation qui se réduit à

$$\frac{I - I'}{I'} = \frac{x}{S} \quad \text{ou} \quad x = S \times \frac{I - I'}{I'}$$

si R est très grand par rapport à X, ce que l'on peut toujours réaliser aisément.

On fait donc agir d'abord la pile dans un circuit très résistant contenant une boussole des tangentes; on observe une dévia-

Digitized by Google

tion δ; puis on intercale entre les pôles un fil de résistance connue S : la déviation est réduite à δ' ; la résistance de la pile est alors donnée par l'expression

$$x = S \times \frac{\tang \delta - \tang \delta'}{\tang \delta'}.$$

Il est bon que la résistance S soit du même ordre de grandeur que celle de la pile.)

§ IX. — Diverses unités proposées pour la mesure des courants.

Les trois sortes d'unités que nous avons adoptées jusqu'à présent sont conventionnelles; elles sont conformes aux habitudes des physiciens français et suffisantes pour la pratique des piles lorsqu'il s'agit de l'industrie.

On a cherché un système d'unités, dites *absolues,* qui, fondé sur des règles rationnelles, fût susceptible d'être adopté par toutes les nations. Le problème posé est une sorte de généralisation du système métrique, basé, comme on sait, sur l'*invariabilité* du méridien terrestre. Les diverses grandeurs que nous offre la nature dans les phénomènes matériels étant évidemment solidaires, le choix de l'*unité de longueur* et de l'*unité de temps* dominent tout le système cherché. Il faut partir de ces unités et déterminer les autres d'après la corrélation de la longueur et du temps avec les diverses grandeurs qu'on veut mesurer.

C'est ainsi que toutes les unités se présentent à notre esprit dans l'ordre suivant, si nous voulons aboutir aux unités nécessaires pour la mesure des courants.

Unités électro-statiques.

Unité de surface, l'étendue d'un carré dont le côté est égal à l'unité de longueur.

Unité de volume, l'étendue d'un cube dont le côté est égal à l'unité de longueur.

Digitized by Google

Unité de masse, celle de l'unité de volume de l'*eau à son maximum de densité.*

Unité de force, celle qui, agissant sur l'unité de masse, lui communique, pendant l'unité de temps, un accroissement de vitesse égal à l'unité de longueur.

Unité d'électricité, celle que l'on doit imaginer sur une sphère conductrice infiniment petite pour que, agissant sur une autre sphère électrisée identique dont le centre est à l'unité de distance de celui de la première, elle donne lieu à une répulsion égale à l'unité de force.

Unité de courant, celui qui fait disparaître une unité de chaque électricité dans l'unité de temps.

Unité de force électro-motrice, celle d'une pile dont un pôle communique avec la terre et l'autre avec une sphère conductrice dont le rayon est l'unité de longueur, lorsque cette sphère prend une unité d'électricité, ou encore, ce qui est plus pratique, celle d'une pile dont les pôles sont réunis respectivement, à l'aide de fils conducteurs, avec deux disques de métal égaux, perpendiculaires à une droite passant par leurs centres, lorsque, la distance mutuelle des disques étant l'unité et leurs surfaces étant égales à l'unité, la force attractive qui s'exerce entre eux est égale à $\frac{1}{8\pi}$ (π est le rapport de la circonférence au diamètre).

Le choix de cette unité résulte de la nouvelle théorie de la pile, qui assimile ses fonctions à celles des sources d'électricité statique; c'est ce que nous essayerons d'exposer dans ce qui suit.

La quantité d'électricité n'est pas la seule grandeur que l'on rencontre dans les phénomènes électriques; il faut y joindre la *tension* ou *potentiel électrique.*

Le potentiel d'un corps électrisé peut être défini par la quantité d'électricité qu'acquiert une sphère conductrice isolée, de rayon égal à l'unité, lorsqu'elle communique par un fil conducteur long et fin avec le corps électrisé; par suite, l'*unité de potentiel* est celui qui donne à notre sphère l'unité d'électricité.

Digitized by Google

Pour comprendre la différence qui existe entre cette fonction électrique et la quantité d'électricité que possède un corps, il suffit de considérer un conducteur électrisé d'une forme quelconque autre que celle de la sphère. Dans ce cas, la quantité d'électricité distribuée sur sa surface n'est pas la même en divers points; c'est ce que montre le plan d'épreuve, petit disque conducteur isolé, avec lequel on touche les divers points de la surface du corps. Il acquiert des quantités différentes d'électricité, plus grandes dans les points où la courbure est plus prononcée que dans ceux où elle est moindre. Mais, si l'on fait communiquer avec une sphère isolée un point quelconque du conducteur électrisé par le moyen d'un fil fin et long, cette sphère acquiert toujours la même quantité d'électricité, quelle que soit la position du point dans le conducteur ou sur sa surface.

En d'autres termes, le *potentiel électrique* est une qualité du corps électrisé essentiellement différente de la distribution d'électricité qui a lieu sur sa surface. Plus le potentiel est grand, plus longue est l'étincelle qu'on tire du corps quand on en approche un corps à l'état naturel. Le potentiel est la mesure exacte de ce qu'on a appelé depuis longtemps *tension électrique,* sans préciser suffisamment le sens de cette expression.

L'*électromètre absolu* de Thomson sert à mesurer le potentiel absolu d'un corps électrisé, rapporté à l'unité que nous venons de définir. En voici le principe.

Deux plateaux de métal égaux sont disposés horizontalement, de façon que leurs centres soient sur la même verticale. Le plateau inférieur est fixe et communique par un fil métallique long et fin avec le corps électrisé. L'autre plateau est suspendu au fléau d'une balance et communique avec le sol. Il y a entre les deux plateaux une attraction que l'on mesure en poids.

Soient

F le poids dont il s'agit;
D la distance des deux plateaux;
S la surface de chacun d'eux.

Digitized by Google

Le potentiel du corps électrisé est, en valeur absolue,

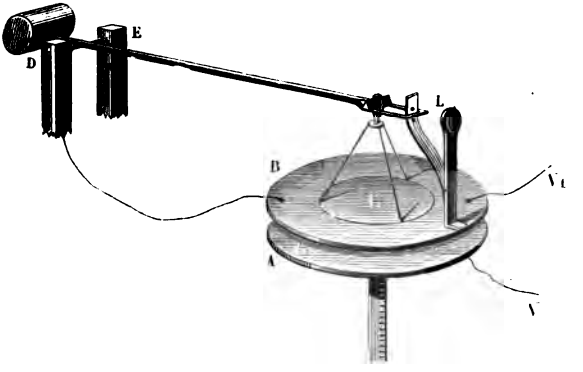
$$V = D\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}. \tag{58}$$

C'est de cette formule que se déduit l'unité de force électromotrice donnée plus haut.

Thomson a réalisé comme il suit un appareil fondé sur le principe que nous venons de mentionner. Nous n'en ferons connaître que les parties essentielles. Les développements se trouvent dans l'Ouvrage intitulé *Reprint of papers on electrostatics and magnetism,* by Sir W. Thomson (Londres, 1872), et un résumé a été donné dans le *Traité d'électricité statique* de M. Mascart (Paris, 1876).

Un disque de métal A (*fig.* 16), horizontal et isolé, peut être

Fig. 16.



élevé ou abaissé d'une quantité connue à l'aide d'une vis micrométrique.

Un plateau de métal B, évidé en son centre, est maintenu fixe horizontalement au-dessus du précédent. Il porte sur une tige isolante une lentille ou loupe L, au foyer de laquelle se trouve une plaque percée de deux petits trous.

Un disque de métal C horizontal est suspendu par trois fils métalliques à l'extrémité du fléau d'une sorte de balance en métal, dont l'axe de rotation est formé par un fil métallique DE,

Digitized by Google

tendu horizontalement entre deux colonnes de métal reliées par un conducteur au plateau B. Le disque C passe librement à travers le plateau annulaire B, et, lorsqu'il est dans le même plan que ce plateau, on aperçoit, en regardant dans la loupe L, un petit cheveu tendu au bout du fléau, lequel paraît au milieu de l'intervalle des deux points noirs très voisins.

Voici comment on mesure la différence des potentiels V_1 et V_2 de deux corps électrisés. Supposons-les positifs l'un et l'autre.

Les plateaux A et B étant à l'état naturel, on place sur le disque C un poids connu p et on l'équilibre par un contrepoids placé sur le fléau, de façon que le cheveu se voie au milieu de l'intervalle des points; puis on ôte le poids p : le fléau remonte et vient buter contre un arrêt convenablement placé.

On fait communiquer le plateau A avec une source constante d'électricité négative, telle que le pôle négatif d'une pile de Volta bien isolée, dont l'autre pôle communique avec le sol. Ce plateau acquiert le potentiel V. On fait communiquer le plateau B avec le corps au potentiel V_1. Par le fléau de balance et les fils de suspension, le disque C acquiert l'électricité positive et le potentiel V_1. Une attraction se produit entre C et A, et l'on amène le cheveu entre les points servant de repères, en faisant mouvoir la vis micrométrique qui déplace le plateau A. Alors la force attractive est égale au poids p. Soit d la distance des deux plateaux A et C; on a

$$V - V_1 = d\sqrt{\frac{8\pi p}{s}},$$

s étant la surface connue du disque C; d n'est pas connu, mais on a noté avec la vis micrométrique la position du disque C. On ne connaît pas davantage V.

On fait communiquer le plateau B avec le corps au potentiel V_2, et l'on répète la manipulation précédente. Soit d' la distance des plateaux A et C quand l'équilibre est établi; on a, sans que cette distance soit connue,

$$V - V_2 = d'\sqrt{\frac{8\pi p}{s}},$$

Digitized by Google

d'où

$$V_1 - V_2 = (d' - d)\sqrt{\frac{8\pi p}{s}}.$$

La nouvelle position de la vis micrométrique donne $d' - d$, et l'on calcule $V_1 - V_2$ par la dernière formule.

Pour expliquer l'usage de cette formule dans la pile, il suffit de remarquer que la théorie donne pour l'équivalent de la formule de Ohm, trouvée par expérience ou appuyée sur d'autres considérations théoriques, la suivante,

$$I = \frac{V}{R}, \tag{59}$$

dans laquelle V désigne la différence algébrique des potentiels qui existent aux deux pôles de la pile et I la quantité de chaque électricité qui disparaît dans le circuit pendant l'unité de temps. C'est ce qu'on a appelé le *débit d'électricité*.

Quant à R, c'est, comme précédemment, la résistance totale du circuit fermé que constitue la pile.

On voit que la quantité V est proportionnelle à la force électro-motrice définie par Ohm et qu'elle lui est égale si l'on prend pour l'intensité du courant I la définition que nous venons de donner.

Quand les unités sont choisies de cette manière, la pile ne diffère plus d'une source d'électricité statique ordinaire. Concevons une machine électrique à plateau de verre, dont le conducteur communique avec le sol. Soient R la résistance du fil de communication, V le potentiel du conducteur de la machine ; il y aura dans le fil un courant électrique d'intensité I tant que la machine sera en activité.

Cette généralisation du courant justifie suffisamment l'adoption des unités précédentes.

Il nous reste à définir l'*unité de résistance;* mais, à cause de la formule de Ohm, cette unité est la conséquence de l'adoption de l'unité d'intensité et de l'unité de force électromotrice.

L'*unité de résistance* est celle d'un fil conducteur qui est

Digitized by Google

traversé par l'unité de courant lorsque ses deux extrémités présentent une différence de potentiel égale à l'unité.

Telles sont les unités que l'on peut appeler *mécaniques* ou *électro-statiques* et qui sont à considérer dans l'étude des piles. Il n'y en a que trois que l'on puisse regarder comme arbitraires : ce sont celles de longueur, de masse et de temps. On se fonde, pour les choisir, sur leur invariabilité et la facilité de les réaliser avec précision. A ce double point de vue, il est évident qu'on doit adopter quelque multiple ou sous-multiple décimal du mètre pour la longueur, l'eau pour la masse, le jour ou l'un de ses sous-multiples usuels pour le temps.

En électricité, les physiciens font encore usage de la *capacité électrique* d'un corps. C'est la quantité d'électricité que doit acquérir le corps isolé pour que son potentiel soit égal à l'unité. A ce point de vue, la pile n'a pas de capacité électrique; mais, lorsqu'un de ses pôles communique avec un conducteur isolé, elle lui donne une quantité d'électricité égale au produit de la capacité électrique de ce corps par le potentiel de ce pôle.

Il résulte de la corrélation établie par Ohm entre l'intensité du courant, la force électro-motrice et la résistance que, deux des trois unités correspondantes étant choisies, la troisième se trouve déterminée. C'est ce que nous avons fait dans l'exposé des mesures que nous avons adoptées précédemment. Nous avons choisi arbitrairement l'unité de résistance, celle de Siemens, et l'unité de courant qu'on appelle *électro-chimique*. Notre unité de force électro-motrice a été la conséquence des deux autres.

On rencontre dans les Mémoires des physiciens d'autres unités rationnelles, dont l'adoption provisoire marque l'acheminement graduel de la science vers un choix d'unités absolues dépouillé, autant que possible, de toute considération arbitraire.

Le mérite d'avoir ouvert la carrière revient à Gauss, qui a, pour la première fois, appliqué au magnétisme les règles de la philosophie naturelle. Il a été suivi par Weber, en ce qui concerne l'électricité.

Digitized by Google

L'*unité de magnétisme* est celle qu'on doit appliquer à un pôle d'aimant pour que, en agissant sur un pôle semblable placé à l'unité de distance du premier, il donne lieu à une répulsion égale à l'unité de force.

Le *moment magnétique* d'un aimant à deux pôles est le produit de la quantité de magnétisme qui réside à chacun des pôles par leur distance mutuelle.

Le *moment d'un couple magnétique* est le produit de la force appliquée à l'un des pôles par la perpendiculaire abaissée de l'autre pôle sur la direction de cette force.

Ces définitions sont nécessaires pour l'intelligence des *unités électro-magnétiques* de Weber.

Unités électro-magnétiques.

Le point de départ des trois unités électro-magnétiques d'intensité, de force électro-motrice et de résistance proposées par Weber est la formule qui représente l'action d'un élément de courant sur un pôle magnétique, action perpendiculaire au plan passant par l'élément et par le pôle. Cette formule est

$$f = \frac{m I_m l \sin\alpha}{d^2}; \tag{60}$$

l est la longueur de l'élément, d sa distance au pôle magnétique, α l'angle que fait cette distance avec la direction du courant qui passe par l'élément; m est le magnétisme résidant au pôle; enfin I_m est l'*intensité* du courant, évaluée en *unités électro-magnétiques*.

Toutes les conséquences mathématiques de cette formule qui sont susceptibles de donner lieu à une expérience réelle peuvent servir à définir l'unité de cette intensité. Weber a choisi la conséquence suivante.

Imaginons (*fig.* 17) un courant circulaire ABC, et sur la perpendiculaire OD passant par son centre, à une très grande distance OD $= d$, le milieu d'un aimant NS, parallèle au plan du cercle.

Digitized by Google

Soient

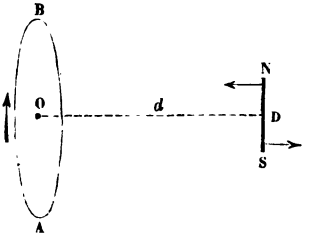
I_m l'intensité du courant en *unités électro-magnétiques;*
m le magnétisme résidant à chaque pôle N, S de l'aimant;
l la distance NS;
s la surface du cercle.

L'aimant est sollicité par un couple qui a pour moment

$$\frac{m I_m l s}{d^3}.$$

Si donc on suppose $m = 1$, $I_m = 1$, $l = 1$, $s = 1$, on a, pour le moment considéré, la quantité $\frac{1}{d^3}$. De là la définition :

Fig. 17.



L'*unité électro-magnétique d'intensité* est l'intensité du courant qui, traversant un conducteur circulaire dont l'aire est égale à l'unité de surface et agissant sur un aimant dont le moment magnétique est égal à l'unité, placé à une grande distance, de façon que son axe soit parallèle au plan du conducteur circulaire et que son milieu soit sur la perpendiculaire au cercle élevée par son centre, produit un couple ayant pour moment l'unité divisée par le cube de la distance qui sépare le milieu de l'aimant du centre du cercle.

Pour l'unité de résistance, Weber a eu recours à l'induction électro-magnétique, dont les formules se rattachent simplement à celles de l'électro-magnétisme. Imaginons un fil conducteur circulaire, comme le précédent, mais à l'état naturel, et plaçons-le parallèlement à l'aiguille d'inclinaison. Lorsqu'on fait tourner ce cercle jusqu'à ce qu'il soit perpendiculaire à l'ai-

Digitized by Google

guille d'inclinaison, il donne lieu à un courant induit dont l'intensité dépend du magnétisme terrestre, de la surface du cercle, de la résistance du fil et de la durée du déplacement.

L'*unité électro-magnétique de résistance* est celle d'un fil conducteur formant un circuit fermé plan, de surface égale à l'unité, et produisant l'unité de courant (*électro-magnétique*) lorsque, placé dans un lieu où l'intensité magnétique terrestre est égale à l'unité, ce fil passe, pendant l'unité de temps, de la position parallèle à l'aiguille d'inclinaison à la position perpendiculaire.

L'*intensité magnétique terrestre* est la force appliquée au pôle d'un aimant possédant l'unité de magnétisme quand cet aimant est soumis à l'action de la Terre seule. Elle est égale à l'unité dans un lieu où cette force est elle-même l'unité.

L'*unité électro-magnétique de force électro-motrice* est la conséquence des deux autres, conformément à la loi de Ohm et à la remarque faite plus haut sur ce sujet, à savoir : Cette unité est celle d'une pile qui produit l'unité électro-magnétique de courant dans un circuit dont la résistance totale est égale à l'unité électro-magnétique de résistance.

Unités électro-dynamiques.

L'action mutuelle des courants, calculable par la formule d'Ampère, a encore servi à Weber à définir des unités d'une autre espèce, qu'il a appelées *électro-dynamiques*.

Le point de départ de cette théorie est la formule qui exprime l'action mutuelle de deux éléments de courant. Lorsque les intensités du courant sont égales à I_d dans les deux éléments, on a, pour cette action, une force dirigée suivant la ligne qui joint les milieux des éléments et ayant pour grandeur

$$f = \frac{I_d^2 ll'}{d^2}\left(\cos\beta - \tfrac{3}{2}\cos\alpha\cos\alpha'\right); \tag{61}$$

d, distance des milieux; β, angle des deux éléments (*fig.* 18); α, α', angles respectifs des éléments avec la droite qui les joint; l, l', longueurs des éléments.

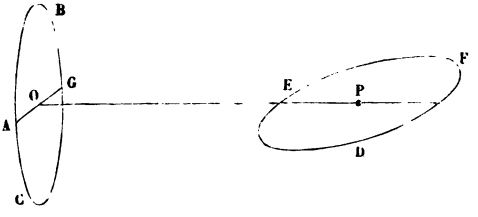
Digitized by Google

Tous les systèmes de courants ayant des formes assez simples pour pouvoir être calculables et réalisables expérimentalement peuvent servir à définir et à mesurer l'intensité électrodynamique.

Fig. 18.

Ainsi Weber a choisi le cas de deux conducteurs circulaires ABC, DEF, traversés par des courants égaux, ayant leurs plans perpendiculaires entre eux, placés loin l'un de l'autre, de telle sorte que le plan de l'un d'eux DEF coupe l'autre suivant un diamètre AG et que la ligne des centres PO soit perpendiculaire au cercle ABC (*fig.* 19). Dans ce cas, l'action des deux courants se représente par un couple calculable par la formule d'Ampère.

Fig. 19.



Si les deux cercles ont une aire égale à l'unité et si le moment du couple est égal à l'unité divisée par le cube de la distance des deux centres, le courant a l'*unité électro-dynamique d'intensité*.

Imaginons que le cercle DEF soit traversé par un courant, mais que ABC soit à l'état naturel. Faisons tourner ce dernier autour de son diamètre AG; nous créerons un courant induit dans DEF.

Si les deux cercles ont une aire égale à l'unité, si le courant inducteur DEF a une intensité égale au double du cube de la distance OP des centres (en *unités électro-dynamiques*) et

Digitized by Google

si le cercle ABC, partant de la position perpendiculaire au cercle DEF, vient se rabattre dans le plan de ce dernier en tournant autour de AG avec une vitesse angulaire égale à l'unité, le circuit induit ABC acquiert l'*unité électro-dynamique de force électro-motrice.*

Quant à l'*unité de résistance électro-dynamique,* elle est déterminée par la formule de Ohm.

Relations entre les unités électro-magnétiques et les unités électro-dynamiques. — Il existe un rapport très simple entre l'unité électro-magnétique et l'unité électro-dynamique d'intensité :

(62) $$I_d = I_m\sqrt{2}.$$

En évaluant l'intensité du courant en unités électro-magnétiques, la formule d'Ampère devient

$$\frac{I_m^2\, ll'}{d^2}(2\cos\beta - 3\cos\alpha\cos\alpha').$$

L'unité électro-magnétique de force électro-motrice est aussi en rapport simple avec l'unité électro-dynamique :

(63) $$E_d = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Enfin l'unité électro-dynamique de résistance est double de l'unité électro-magnétique

(64) $$R_d = \tfrac{1}{2}R_m.$$

Il est aisé de vérifier ces relations par la formule de Ohm.

On a en unités électro-magnétiques, pour un circuit donné,

$$I_m = \frac{E_m}{R_m}.$$

Exprimons les trois quantités en unités électro-dynamiques ; on a

$$I_m\sqrt{2} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} : \frac{R_m}{2} \quad \text{ou bien} \quad I_d = \frac{E_d}{R_d}. \qquad \text{C. Q. F. D.}$$

On n'a pas généralement adopté les unités électro-dynamiques.

Digitized by Google

Les unités électro-magnétiques, au contraire, sont très usitées; elles offrent l'avantage d'assimiler les aimants aux solénoïdes, car l'unité électro-magnétique d'intensité peut être définie *le courant qui parcourt un cercle de surface égale à l'unité, en produisant la même action qu'un aimant qui possède l'unité de moment magnétique.*

§ X. — Règles de conversion.

Conversion des unités électro-magnétiques en unités électro-statiques. — Nous appellerons I_e, E_e et R_e les trois quantités du courant en unités électro-statiques, rapportées au millimètre, à la masse de 1^{mmc} d'eau et à la seconde, Q_e la quantité de chaque électricité employée par le circuit dans le temps t, exprimée dans les mêmes unités.

D'après la théorie mécanique de l'électricité, il y a entre les deux pôles de la pile une différence de potentiel E_e et le produit $E_e \times Q_e$ mesure le travail mécanique développé dans le circuit pendant le temps t; si le courant ne sert qu'à produire de la chaleur, cette chaleur est équivalente au travail : c'est sous cette forme qu'il se manifeste. L'unité de ce travail est le travail de l'unité de force agissant sur un point matériel, de manière qu'il se déplace de l'unité de longueur dans la direction de la force. D'ailleurs $Q_e = I_e \times t$.

En faisant usage des unités électro-magnétiques, nous conservons les mêmes unités de longueur et de force; le travail dont il s'agit conserve la même valeur numérique; ce que nous changeons, c'est l'unité de courant. Pour pouvoir appliquer la considération du travail aux nouveaux nombres, il suffit de prendre pour unité d'électricité celle qui disparaît en l'unité de temps dans un circuit traversé par un courant d'intensité égale à l'unité électro-magnétique. Par suite, si cette intensité est I_m, la quantité de chaque électricité disparue en t secondes est $Q_m = I_m \times t$ en *unités de quantité électro-magnétique.* D'ailleurs la différence des potentiels est E_m et le travail élec-

Digitized by Google

trique peut être exprimé par $Q_m \times E_m$. Si l'unité d'électricité du système électro-magnétique est K fois plus grande que celle du système électro-statique, on a par compensation une unité de potentiel K fois plus petite, de sorte que

$$Q_e \times E_e = Q_m \times E_m$$

ou bien

$$\frac{Q_m}{Q_e} = \frac{E_e}{E_m} = \frac{1}{K},$$

d'où

$$E_e = \frac{E_m}{K}. \tag{65}$$

Nous allons voir que ce coefficient K est le seul nombre dont on ait besoin pour effectuer la conversion. On a, en effet,

$$\left.\begin{aligned} \frac{Q_e}{t} &= I_e \\ \frac{Q_m}{t} &= L_m \end{aligned}\right\} \text{ d'où } \quad (66) \quad I_e = KI_m,$$

$$\left.\begin{aligned} R_e &= \frac{E_e}{I_e} \\ R_m &= \frac{E_m}{I_m} \end{aligned}\right\} \text{ d'où } \quad (67) \quad R_e = \frac{R_m}{K^2}.$$

De là on tire les règles suivantes :

On passe des unités électro-magnétiques aux unités électro-statiques, pour l'intensité, en multipliant par le nombre K; *pour la force électro-motrice, en divisant par ce nombre; pour la résistance, en divisant par le carré du même nombre.*

C'est à l'expérience de faire connaître K, c'est-à-dire combien d'unités électro-statiques de chaque électricité disparaissent en une seconde dans un circuit ayant une intensité électro-magnétique égale à l'unité. D'après les expériences de MM. Kohlrausch et Weber, ce nombre est 155 370 millions d'unités électro-statiques (millimètres). Ce nombre n'est pas, du reste, très exact; la méthode employée pour le déterminer ne comporte guère qu'une approximation de $\frac{1}{25}$.

Conversion des unités arbitraires (9^{mgr} d'eau en une se-

Digitized by Google

conde, unité Siemens de résistance) *en unités électro-magnétiques et électro-statiques de Weber.*

1° L'unité de courant que nous avons adoptée jusqu'ici décompose 9^{mgr} d'eau en une seconde. D'après les expériences de Weber et de plusieurs autres physiciens, elle vaut $9 \times 106,7 = 960,3$ unités électro-magnétiques de Weber. C'est donc par ce nombre qu'on multipliera nos nombres d'intensité pour les réduire aux unités électro-magnétiques (millimètres).

2° Notre unité de résistance, étant celle de 1^{m} de mercure ayant une section de 1^{mmq}, vaut, d'après les expériences de Weber, 9040000000 unités électro-magnétiques. C'est par ce nombre qu'on doit multiplier nos nombres de résistance pour opérer la conversion.

3° Il reste à calculer les forces électro-motrices. Appelons I, E, R les trois valeurs de l'intensité, de la force électro-motrice, de la résistance, rapportées à nos unités. Pour passer aux unités électro-magnétiques, il faut les multiplier respectivement par les coefficients K', K'', K''', et l'on doit, pour satisfaire à la loi de Ohm, avoir

$$K'I = \frac{K''E}{K'''R}.$$

Or $I = \frac{E}{R}$; donc

$$K' = \frac{K''}{K'''}.$$

K' et K''' étant connus par ce qui précède, on calculera

$$K'' = K'K''' = 960,3 \times 9040000000 = 8681100000000.$$

Pour réduire nos nombres de force électro-motrice à l'unité électromagnétique, on les multipliera par 86811×10^{8}.

Application des règles précédentes. — Nous allons exprimer, à l'aide des trois sortes d'unités, *arbitraires, électro-magnétiques, électro-statiques,* les résultats d'une de nos expériences déjà décrite (p. 58).

Un circuit était formé par 4 éléments de Bunsen, à auges

Digitized by Google

rectangulaires, et par une boussole de tangentes. Avec nos unités arbitraires, on a obtenu

$$I = 0,011846 \text{ (unités électro-chimiques)},$$
$$E = 4 \times 0,024 = 0,096,$$
$$R = 8,104 \text{ (unités Siemens)}.$$

Réduction aux unités électro-magnétiques:

I_m.....	$960,3 \times I$	
$\log I$.....	$\bar{2},073\,5717$	
$\log 960,3$.....	$2,982\,4069$	
$\log I_m$.....	$1,055\,9786$	$I_m = 11,3757$
E_m.....	$86811 \times 10^8 \times E$	
$\log E$.....	$\bar{2},982\,2712$	
$\log 86811 \times 10^8$..	$12,938\,5748$	
$\log E_m$.....	$11,920\,8460$	$E_m = 83338 \times 10^7$
R_m.....	$904 \times 10^7 \times R$	
$\log R$.....	$0,908\,6994$	
$\log 904 \times 10^7$....	$9,956\,1684$	
$\log R_m$.....	$10,864\,8678$	$R_m = 73260 \times 10^6$

Réduction aux unités électro-statiques. — Il suffit d'appliquer les règles de conversion des unités électro-magnétiques en unités électro-statiques avec

$$K = 15537 \times 10^7, \quad \log K = 11,1913672,$$
$$\log K^2 = 22,3827344 :$$

I_e.....	KI_m	
$\log I_e$...	$12,247\,3458$	$I_e = 17674 \times 10^8$
E_e.....	$\frac{E_m}{K}$	
$\log E_e$...	$0,729\,4788$	$E_e = 5,3639$
R_e.....	$\frac{R_m}{K^2}$	
$\log R_e$...	$\overline{12},482\,1334$	$R_e = \frac{1}{10^{12}} \times 30348$

Sur les six nombres ainsi calculés, il n'y en a que deux qui soient d'un ordre de grandeur acceptable dans la pratique. Les autres sont énormément grands ou excessivement petits.

Digitized by Google

§ XI. — Unités de l'Association britannique.

C'est cette difficulté que l'Association britannique pour l'avancement des sciences a essayé de vaincre dans une série de recherches dont les résultats ont été publiés dans les *Proceedings of the Royal Society* de 1862 à 1867. On trouvera sur cette question les détails suffisants dans un Volume intitulé *Electricity and magnetism,* dont l'auteur est M. Fleeming Jenkin (Londres, Longmans, Green et Cie, 1873), l'un des membres de la Commission qui a exécuté ces recherches.

On a renoncé à introduire dans la pratique les seules unités qui fussent vraiment rationnelles, à savoir les *unités électrostatiques,* à cause de l'énorme disproportion qui existe entre les unités d'intensité et de résistance, disproportion qu'on ne peut éviter par un changement dans l'unité de longueur. On a pris pour base le système des *unités électro-magnétiques de Weber,* et l'on a adopté des multiples décimaux de ces unités auxquels on a donné des noms qui rappellent les principaux électriciens dont les travaux ont préparé la solution du problème proposé.

Unités fondamentales de l'Association.

1° *Résistance.* Le *ohm* vaut 10^{10} unités électro-magnétiques de Weber (rapportées au millimètre).

2° *Intensité du courant.* Le *weber* (seconde) vaut 10 unités électro-magnétiques. Quelques auteurs anglais l'appellent *farad.*

3° *Force électro-motrice.* Le *volt* vaut 10^{11} unités électro-magnétiques.

Appliquons ces unités à notre exemple (p. 77).

Pour exprimer l'intensité électro-magnétique (millimètre) en webers, il faut diviser par 10, de sorte que

$$I_b = \frac{1}{10} I_m = 1,13757 \text{ webers.} \tag{68}$$

Digitized by Google

Pour exprimer la force électro-motrice électro-magnétique (millimètre) en volts, il faut diviser par 10^{11} :

$$E_b = \frac{1}{10^{11}} E_m = 8,3338 \text{ volts.} \tag{69}$$

Enfin, pour exprimer en ohms la résistance électro-magnétique (millimètre), il faut diviser par 10^{10} :

$$R_b = \frac{1}{10^{10}} R_m = 7,326 \text{ ohms.} \tag{70}$$

On peut d'ailleurs vérifier que

$$I_b = \frac{E_b}{R_b}.$$

En exprimant les quantités que l'on considère dans les piles en *unités britanniques,* on a des nombres pratiques qui ont pour base des types peu différents de ceux auxquels on est habitué. Ces unités sont donc très recommandables, et leur emploi est maintenant à peu près général. Il faut bien remarquer toutefois qu'elles sont fondées sur les unités électro-magnétiques de Weber et qu'en cela leur point de départ est arbitraire, puisque ces unités ne conviennent pas à l'électrostatique. Le seul système d'unités absolues qui soit vraiment digne de détruire tous les autres est celui que nous avons appelé *mécanique* ou *électro-statique.* Il est probable que les efforts des physiciens seront tournés de ce côté, surtout en Allemagne, où les unités britanniques ne sont pas partout accueillies avec beaucoup d'empressement.

Pour faciliter la lecture des différents auteurs, nous croyons utile de faire connaître quelques autres unités qui se rattachent aux précédentes. Nous empruntons la plupart de ces renseignements à l'Ouvrage de M. Fleeming Jenkin.

Outre l'intensité du courant, la force électro-motrice et la résistance, on considère en électricité, surtout en télégraphie, la quantité d'électricité et la capacité électrique d'un conducteur. Rappelons que cette dernière est la quantité d'électricité nécessaire pour faire acquérir au conducteur isolé et soustrait à

Digitized by Google

l'influence des corps voisins l'unité de potentiel électrique, et que, si le conducteur est électrisé à un potentiel quelconque V, on obtient la quantité d'électricité Q qu'il possède en multipliant ce potentiel par la capacité C :

$$Q = CV.$$

Si l'on prend le système d'unités électro-statiques, la capacité d'une sphère conductrice est mesurée par le même nombre que son rayon. Quant au potentiel, il sera donné par l'électromètre absolu de Thomson, dont l'un des plateaux communiquera avec la sphère électrisée et l'autre avec le sol. On fera usage de la formule citée (p. 67).

Par exemple, une sphère de $0^m,500$ de rayon a une capacité de 500 unités d'électricité, et, si on la fait communiquer avec le pôle positif d'une pile de 1000 éléments de Daniell, le pôle négatif communiquant avec le sol, on fait acquérir à cette sphère le potentiel 374,86. Par suite, la quantité d'électricité qu'elle reçoit est $500 \times 374,86 = 187430$ unités électro-statiques rapportées au millimètre.

Un condensateur plan formé par deux plateaux de métal ayant chacun 1^{mq} de surface et séparés par un intervalle d'air de $0^m,001$ ayant ses plateaux respectivement en communication avec les pôles de la même pile acquiert 2 976 000 unités électro-statiques. Si les plateaux étaient séparés par une lame de gutta-percha de $0^m,001$ d'épaisseur, la charge serait, dans les mêmes circonstances, quadruple de la précédente. Le nombre 4 mesure la *capacité inductive* de la gutta, rapportée à celle de l'air.

L'Association britannique appelle *farad* une capacité électrique de $\frac{1}{10^{10}}$ d'unité électro-magnétique absolue de capacité rapportée au millimètre. La capacité électro-magnétique s'obtient en divisant la capacité électro-statique par le coefficient K^2 précédemment calculé.

L'unité de quantité d'électricité de l'Association est celle que contient un farad, électrisé au potentiel d'un volt; elle vaut

Digitized by Google

10 unités électro-magnétiques d'électricité. On l'appelle le *weber*. Pour distinguer cette quantité de l'unité de courant, on appelle quelquefois celle-ci le *weber seconde*, indiquant par là qu'on dépense un weber d'électricité par seconde dans le circuit.

Telles sont les cinq unités fondamentales de l'Association britannique, dérivées toutes des unités électro-magnétiques de Weber par des coefficients qui ne renferment que des puissances entières de 10, à savoir :

Unité de résistance, l'*ohm*;
» quantité, le *weber*;
» courant, le *weber seconde*;
» force électro-motrice ou potentiel, le *volt*;
» capacité électrique, le *farad*.

On passe des unités électro-magnétiques aux électro-statiques, ou *vice versa*, à l'aide d'un seul coefficient K qui exprime combien l'unité électro-magnétique de courant vaut d'unités électro-statiques. Il suffit d'employer les formules suivantes, où l'indice m indique le système électro-magnétique, l'indice e le système électro-statique :

$$(71)\qquad \begin{cases} R_m = K^2 R_e, \\ Q_m = \dfrac{Q_e}{K}, \\ I_m = \dfrac{I_e}{K}, \\ E_m = K E_e, \\ C_m = \dfrac{C_e}{K^2}. \end{cases}$$

Il n'y a donc qu'à fixer la valeur de K. Nous avons indiqué pour cette quantité le nombre donné par Weber; mais des expériences faites par d'autres méthodes donnent des nombres assez différents de celui-là, et il règne de l'incertitude sur cette valeur. Tant que les unités électro-statiques n'auront qu'une importance théorique et qu'on se servira des unités arbitraires,

Digitized by Google

ou des unités anglaises, l'incertitude de K ne présentera pas d'inconvénients pour les résultats pratiques qui intéressent l'industrie.

S'il s'agit de quantités très grandes ou très petites par rapport aux unités fondamentales, on évite un trop grand nombre de chiffres ou de décimales en faisant usage de certains multiples ou sous-multiples de ces unités. *Méga* comme préfixe indique 1 million d'unités fondamentales, *micro* indique $\frac{1}{1000000}$ d'unité. Par exemple, un *mégohm* représente une résistance de 1 000 000 d'ohms; un *microfarad*, une capacité de $\frac{1}{1000000}$ de farad.

Nous avons rapporté tous nos calculs au millimètre de longueur et à la masse de 1^{mmc} d'eau à $4^{\circ},1$ (milligramme des auteurs anglais). Quelques auteurs choisissent une autre unité de longueur et une autre unité de masse, ce qui change les rapports des unités correspondantes.

Nous donnons, d'après M. Jenkin, la Table X, qui facilitera les réductions pour passer des unités de l'Association britannique aux unités électro-magnétiques. Les nombres placés sur une même ligne horizontale indiquent les valeurs équivalentes d'une même grandeur, désignée par les noms inscrits dans la première colonne verticale.

Cette Table servira également à passer des unités arbitraires, que nous avons employées précédemment, aux unités de l'Association britannique, et réciproquement.

Dans le premier cas, on suivra les règles données précédemment pour connaître I_m, E_m, R_m (en unités électro-magnétiques rapportées au millimètre). En divisant par le nombre de la dernière colonne, qui correspond à l'unité anglaise que l'on veut adopter, on aura le nombre cherché.

Exemples. — 1° *D'après Weber, la force électro-motrice de 1 élément de Daniell est* $10\,258 \times 10^7$ *unités électro-magnétiques* (*millimètre*) : *combien cela vaut-il de volts?*

Dans la dernière colonne, sur la ligne du mot *volt*, nous lisons 10^{11} : c'est par ce nombre qu'il faut diviser la force

Digitized by Google

électro-motrice donnée. On obtient

$$1,0258 \text{ volt.}$$

La valeur de cette quantité n'est pas rigoureusement constante; elle varie de quelques centièmes, ce qui fait rejeter l'élément de Daniell comme type.

M. Latimer Clark a proposé un couple formé par le mercure et une pâte de sulfate de mercure d'une part, le zinc et une solution saturée de sulfate de zinc de l'autre. Sa force électro-motrice est 1,457 volt (*Journal de Physique*, 1873), et elle a paru invariable à l'auteur dans les premiers instants de la fermeture seulement, ce qui suffit pour les comparaisons.

2° *D'après Weber, un cylindre de mercure ayant* 1^{m} *de longueur et* 1^{mmq} *de section* (*unité de résistance de Siemens*) *vaut* 904×10^{7} *unités électro-magnétiques de résistance : combien vaut-il d'ohms ?*

Dans la dernière colonne, sur l'horizontale du mot *ohm*, nous lisons 10^{10} : c'est par ce nombre qu'il faut diviser le précédent. On obtient

$$0,904 \text{ ohm.}$$

C'est à 0° que cette valeur convient. D'autres physiciens ont donné 0,954. Il ne semble pas que les méthodes donnent toute l'approximation désirable.

Digitized by Google

TABLE X. — Comparaison des unités britanniques et des unités électro-magnétiques.

UNITÉS BRITANNIQUES.		UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES DE WEBER.			
		Unité de longueur : mètre. Unité de masse : centimètre cube d'eau.	Unité de longueur : centimètre. Unité de masse : centimètre cube d'eau.	Unité de longueur : millimètre. Unité de masse : centimètre cube d'eau.	Unité de longueur : millimètre. Unité de masse : millimètre cube d'eau.
Résistance	Mégohm	10^{13}	10^{15}	10^{16}	10^{16}
	Ohm	$10^{7} = 10\,000\,000$	$10^{9} = 1\,000\,000\,000$	$10^{10} = 10\,000\,000\,000$	$10^{10} = 10\,000\,000\,000$
	Microhm	10	10^{3}	10^{4}	10^{4}
Intensité du courant [par seconde (¹)]	Mégaweber seconde.	10^{4}	10^{5}	$3{,}162 \times 10^{5}$	10^{7}
	Weber seconde	$10^{-2} = \frac{1}{100}$	$10^{-1} = \frac{1}{10}$	$3{,}162 \times 10^{-1} = 0{,}3162$	10
	Microweber seconde.	10^{-8}	10^{-7}	$3{,}162 \times 10^{-7}$	10^{-5}
Quantité (par volt).	Mégaweber	10^{4}	10^{5}	$3{,}162 \times 10^{5}$	10^{7}
	Weber	$10^{-2} = \frac{1}{100}$	$10^{-1} = \frac{1}{10}$	$3{,}162 \times 10^{-1} = 0{,}3162$	10
	Microweber	10^{-8}	10^{-7}	$3{,}162 \times 10^{-7}$	10^{-5}
Force électro-motrice	Mégavolt	10^{11}	10^{14}	$3{,}162 \times 10^{15}$	10^{17}
	Volt	$10^{5} = 100\,000$	$10^{8} = 100\,000\,000$	$3{,}162 \times 10^{9} = 3\,162\,000\,000$	$10^{11} = 100\,000\,000\,000$
	Microvolt	10^{-1}	10^{2}	$3{,}162 \times 10^{3}$	10^{4}
Capacité	Farad	$10^{-7} = \frac{1}{10\,000\,000}$	$10^{-9} = \frac{1}{1\,000\,000\,000}$	$10^{-10} = \frac{1}{10\,000\,000\,000}$	$10^{-10} = \frac{1}{10\,000\,000\,000}$
	Microfarad	10^{-13}	10^{-15}	10^{-16}	10^{-16}

(¹) M. Jenkin n'a pas adopté dans son Livre le mot *weber;* il met partout *farad*, ce qui nuit à la précision du langage. Nous pensons que la plupart des physiciens anglais n'hésitent pas à adopter le weber et le weber seconde.

Digitized by Google

3° *Un fil de cuivre pur pesant* $22^{gr},4932$, *ayant* $7^{m},61975$ *de longueur et* $0^{mm},667$ *de diamètre à* 0° (*étalon de Jacobi*), *vaut, d'après Weber,* 598×10^{7} *unités électro-magnétiques de résistance : combien vaut-il d'ohms?*

En suivant la règle précédente, on trouve 0,598 ohms.

4° *L'intensité d'un courant est, en unités électro-chimiques* ($0^{gr},009$ *d'eau décomposés par seconde*), 1,1846 : *combien vaut-elle de webers seconde?*

En multipliant par 960,3, on obtient 1137,57 unités électro-magnétiques. Sur la ligne horizontale des webers seconde, nous trouvons 10 à la dernière colonne : c'est par ce nombre qu'il faut diviser. On a donc

113,757 webers seconde.

Pour opérer la conversion des unités anglaises aux unités arbitraires électro-chimiques, on commencera par multiplier le nombre donné par le facteur de la dernière colonne qui correspond à l'unité dont il s'agit; puis on divisera le résultat par le coefficient donné page 76 pour le passage des unités arbitraires aux unités électro-magnétiques.

Exemple. — *Quelle est la force électro-motrice en unités arbitraires électro-chimiques d'une pile de* 100 *volts?*

Nous cherchons le volt dans la première colonne verticale, puis nous suivons la ligne horizontale jusqu'à la dernière colonne. Nous trouvons 10^{11} : cela fait 100×10^{11}. Il faut diviser par 86811×10^{8}, ce qui donne

$$\frac{10^{3}}{86811} = 1,1519.$$

Dans un circuit de résistance 1 Siemens, une pareille force électro-motrice produirait un courant qui dégagerait environ $0^{gr},001$ d'hydrogène en une seconde en décomposant l'eau.

Nous donnerons un aperçu de la grandeur réelle des unités

Digitized by Google

britanniques par les remarques suivantes, que nous empruntons au Livre de M. Jenkin.

L'ohm est équivalent à environ 485^m de fil de cuivre pur de $0^m,001$ de diamètre à 0° C.

Le volt est de 5 à 10 pour 100 moindre que la force électromotrice de 1 élément Daniell.

Le weber (seconde) est à peu près le courant que produirait 1 élément Daniell dans un circuit dont la résistance totale est 1 ohm. Peu d'éléments de Daniell peuvent actuellement produire un tel courant, parce qu'ils ont eux-mêmes une résistance supérieure à celle de 1 ohm. Un seul élément Daniell enverrait environ 125 microwebers dans le câble transatlantique.

Nous terminerons cet exposé élémentaire des unités électriques par la comparaison des diverses unités de résistance qui ont été mises en usage.

Il importe d'abord de se rendre compte du degré de précision avec lequel le Comité de l'Association britannique a réalisé un étalon valant aussi exactement qu'il a été possible 10^{10} unités électro-magnétiques de Weber (rapportées au millimètre).

On a eu recours à une méthode proposée par Thomson, et dont voici le principe.

Un anneau circulaire recouvert d'un fil conducteur isolé et fermé sur lui-même peut tourner autour d'un diamètre vertical. Au centre de cet anneau est un petit aimant muni d'un miroir, afin qu'en visant dans ce miroir l'image d'une échelle divisée on mesure la déviation, qui se produit sous l'influence des courants induits par le magnétisme terrestre dans le cadre en mouvement.

Soient

L la longueur du fil conducteur;
V la vitesse de rotation de l'anneau;
a le rayon du cercle formé par le fil;
D la déviation imprimée à l'aimant par le mouvement de l'anneau.

On obtient la résistance absolue du fil de l'appareil par la for-

Digitized by Google

mule

$$R = \frac{L^2 V}{4 a^2 \operatorname{tang} D} \quad (^1),$$

On en déduit la longueur du fil qui a l'unité de résistance.

Pour estimer l'approximation, on doit comparer les longueurs ainsi trouvées, lesquelles doivent différer très peu les unes des autres. On peut ensuite calculer la valeur exacte en ohms de l'unité de longueur d'un fil qui aurait une résistance spécifique égale à l'unité et une section égale à l'unité; on doit trouver alors des valeurs très peu différentes de 1.

C'est ce qui apparaît dans le Tableau suivant, qui contient les résultats de diverses déterminations faites par le Comité en 1863 et en 1864, avec des vitesses de rotation très différentes.

Nous donnons la durée approximative de 100 tours du cercle mobile en secondes :

Durée de 100 révolutions. Valeur approchée.	Valeur exacte de l'étalon.	Erreur relative.
s 17,56	0,9978	— 0,0022
76,89	1,0040	+ 0,0040
54,25	0,9992	— 0,0008
41,77	0,9925	— 0,0075
53,92	0,9924	— 0,0076
17,74	1,0007	+ 0,0007
17,79	1,0063	+ 0,0063
16,95	1,0043	+ 0,0043
21,36	1,0022	+ 0,0022
21,50	1,0040	+ 0,0040
14,00	0,9981	— 0,0019

D'après cela, la valeur de l'étalon pris pour l'ohm pratique serait exacte à $\frac{1}{500}$ environ.

Le Comité de l'Association britannique a comparé son unité pratique aux diverses unités dont on se servait jusqu'alors. Dans ce qui suit, l'unité A est seule théorique, c'est-à-dire

(1) *Reports of the Committee on electrical standards*, p. 48; Londres, 1873.

Digitized by Google

qu'on lui suppose la valeur exacte de la définition. Les autres sont des quantités purement techniques qui ont été réalisées en étalons, servant ensuite à la graduation des bobines de résistance.

Telle est, par exemple, l'unité D, qui diffère notablement de la valeur théorique qu'on avait l'intention de lui attribuer en la construisant.

Comparaison des unités pratiques de résistance qui ont été mises en usage jusqu'à ce jour.

Les principales unités qui ont été employées sont :

A. *L'unité électro-magnétique absolue,* valeur théorique définie précédemment, page 71, rapportée au pied et à la seconde. Nous la multiplions par 10^7 pour établir la comparaison de cette unité aux autres, afin d'avoir des nombres plus commodes à mettre en Tableau.

B. *L'unité de Thomson,* valeur pratique de l'unité précédente d'après les expériences de Weber, antérieures à celles de l'Association britannique.

C. *L'unité pratique de Jacobi,* 25 pieds d'un fil de cuivre pesant 345 grains.

D. *L'unité électro-magnétique absolue de Weber,* définie théoriquement page 71, rapportée au mètre et à la seconde. Nous la multiplions par 10^7 pour la raison donnée ci-dessus. On considère ici une valeur pratique obtenue en 1862 par Weber sur un étalon de Thomson.

E. *L'unité pratique de Siemens,* un cylindre de mercure pur à 0°, ayant 1^m de longueur et 1^{mmq} de section.

Les résistances des étalons construits par Siemens avant 1866 doivent être multipliées par 1,0029. Cela résulte de ce que, avant cette époque, on avait adopté un poids spécifique trop faible pour le mercure.

F. *L'unité de l'Association britannique* ou *ohm,* étalon réel représentant aussi exactement que possible la quantité définie page 78.

Digitized by Google

G. *L'unité télégraphique française*, suivant Digney, 1^{km} de fil de fer de $0^{m},004$ de diamètre.

H. *La même unité*, d'après Bréguet, présentant une légère différence dans sa valeur pratique.

I. *L'unité télégraphique suisse*, suivant Hipp, définie comme les deux précédentes et en différant très peu.

K. *L'unité de Matthiessen*, 1 mille anglais ($1609^{m},34$) de fil de cuivre pur de $\frac{1}{16}$ de pouce de diamètre à $15^{\circ},5$ C.

L. *L'unité de Varley*, unité arbitraire, 1 mille anglais d'un fil de cuivre particulier ayant $\frac{1}{16}$ de pouce de diamètre. Plus tard, M. Varley changea son unité et lui donna pour valeur 25 unités de Siemens.

M. *L'unité télégraphique allemande avant* 1848, 1 mille allemand ($7532^{m},83$) de fil de cuivre ayant $\frac{1}{12}$ de pouce à 20° C.

La Table XI sert à passer d'une unité à une autre. On cherche dans la première colonne verticale le nom de l'unité à laquelle est rapporté le nombre donné, puis on suit la ligne horizontale qui part de ce nom jusqu'à la colonne verticale en tête de laquelle est inscrit le nom de la nouvelle unité. Le nombre rencontré est le facteur de conversion.

Digitized by Google

TABLE XI. — Comparaison des diverses unités de résistance (d'après Jenkin).

	A.	B.	C.	D.	E.	F.	G.	H.	I.	K.	L.	M.
A. Unité électro-magn. absolue, $\frac{\text{pied}}{\text{seconde}} \times 10^7$ (valeur théor.).	1,000	0,9520	0,4788	0,3316	0,3197	0,3048	0,03289	0,03123	0,02924	0,02243	0,01190	0,005307
B. Unité Thomson (anc. étalon).	1,0505	1,0000	0,5029	0,3483	0,3358	0,3202	0,03455	0,03279	0,03071	0,02357	0,01251	0,005574
C. Unité Jacobi.....	2,0880	1,9880	1,0000	0,6925	0,6675	0,6367	0,06869	0,06520	0,06106	0,04686	0,02486	0,01108
D. Unité électro-magn. de Weber, $\frac{\text{mètre}}{\text{seconde}} \times 10^7$ (ancien étalon).	3,015	2,871	1,444	1,0000	0,9635	0,9191	0,09919	0,09416	0,08817	0,06767	0,03591	0,01655
E. Unité Siemens (nouvel étalon).....	3,129	2,979	1,498	1,038	1,0000	0,9536	0,1030	0,0977	0,0915	0,07026	0,03726	0,0166
F. Unité de l'Association britannique (Ohm) (étalon réel).	3,281	3,123	1,570	1,088	1,0486	1,0000	0,1079	0,1024	0,0959	0,0736	0,03905	0,01741
G. Unité télégraphique française (Digney).....	30,40	28,94	14,56	10,08	10,0971	9,266	1,000	0,9491	0,8889	0,6822	0,3620	0,1613
H. Unité télégraphique française (Breguet).....	32,03	30,50	15,34	10,62	10,23	9,760	1,054	1,0000	0,9365	0,7187	0,3814	0,1700
I. Unité télégraphique suisse (Hipp).....	34,21	32,56	16,38	11,34	10,93	10,42	1,125	1,068	1,000	0,7675	0,4072	0,1815
K. Unité de Matthiessen.....	44,57	42,43	21,34	14,78	14,23	13,59	1,66	1,391	1,303	1,000	0,5306	0,2365
L. Unité de Varley.....	84,01	79,96	40,21	27,85	26,83	25,61	2,763	2,622	2,456	1,885	1,0000	0,4457
M. Unité télégraphique allemande.....	188,4	179,4	90,22	62,48	60,21	57,44	6,198	5,882	5,509	4,228	2,243	1,000

USAGE DE CETTE TABLE. — *Convertir en unités Siemens une résistance évaluée en fil télégraphique de Breguet.* La première colonne fournit l'unité télégraphique de Breguet à la lettre H; l'unité Siemens est désignée par E. On cherchera la colonne verticale en tête de laquelle est la lettre E et l'on descendra verticalement jusqu'à l'horizontale de la lettre H. On trouve 10,23. C'est par ce nombre qu'il faut multiplier la résistance donnée pour l'évaluer en unités Siemens.

Digitized by Google

DESCRIPTION

DES

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

On appelle *pile hydro-électrique* un appareil composé de parties solides et de parties liquides qui donnent lieu à des combinaisons chimiques en produisant de l'électricité. On distingue deux grandes classes de piles : la première comprend celles qui ne renferment qu'un seul liquide; la seconde, celles qui en renferment deux, séparés l'un de l'autre en général par une cloison poreuse. Chacune de ces classes de piles peut être divisée elle-même en deux sections, suivant qu'il y a *polarisation* ou qu'il n'y en a pas : nous placerons dans cette dernière les piles où la polarisation, sans être tout à fait nulle, est très faible et négligeable. Ce mode de classification n'est peut-être pas le plus rationnel, mais il offre l'avantage de grouper les faits le plus simplement possible et de suivre à peu près l'ordre chronologique.

CHAPITRE PREMIER.

PREMIÈRE CLASSE. — PILES A UN SEUL LIQUIDE.

PREMIÈRE SECTION. — PILES AVEC POLARISATION.

§ I. — Pile de Volta.

Ce qui caractérise cette pile, la première par ordre chronologique, c'est la réunion d'une lame de zinc et d'une lame de

Digitized by Google

cuivre, séparées l'une de l'autre par une couche d'eau salée ou acidulée. La nature de la substance dissoute influe sur la force électro-motrice; habituellement on se sert d'acide sulfurique, dont le prix est peu élevé et l'action chimique très puissante, et on l'étend de seize fois son volume d'eau.

Voici l'action chimique qui se passe. En présence de l'acide, le zinc décompose l'eau, se combine avec l'oxygène pour former de l'oxyde de zinc, tandis que l'hydrogène se dégage. L'oxyde de zinc se combine à son tour avec l'acide sulfurique et forme du sulfate de zinc, sel qui se dissout dans l'eau. Quant au cuivre, il ne subit pas d'action chimique notable.

En même temps que ces actions chimiques se produisent, on constate que le zinc est électrisé négativement, tandis que le cuivre est électrisé positivement.

Quand on considère une série d'éléments assemblés en pile, le zinc de chaque élément communique avec le cuivre de l'élément voisin à l'aide d'un conducteur de cuivre, et, pour reconnaître de quel côté est le pôle positif, on examine un seul élément. Le côté de la pile qui est en communication avec la lame de cuivre est le pôle positif.

La force de polarisation résulte, dans l'élément de Volta, de deux causes : 1° la fixation de l'hydrogène sur la lame de cuivre; 2° la décomposition du sulfate de zinc, avec dépôt de zinc sur le cuivre.

Chacune de ces circonstances donne lieu à une force électro-motrice contraire de celle de la pile, et qui diminue l'intensité du courant avec une assez grande rapidité. Aussi ne doit-on pas employer ce genre de pile et celles qui en dérivent pour établir un circuit fermé pendant un temps assez long.

Lorsque le circuit est ouvert, le zinc donne lieu à la même combinaison qu'avec le circuit fermé, de façon que l'usure de ce métal est très rapide et qu'on est obligé de sortir les parties métalliques du liquide excitateur lorsqu'on ne se sert pas du courant.

La résistance de l'élément diminue quand on augmente l'étendue des lames métalliques et quand on diminue la dis-

Digitized by Google

tance qui les sépare. Elle augmente avec la quantité de sulfate de zinc dissous dans l'eau.

Ces remarques faciliteront la comparaison des diverses formes de piles dérivant du type de Volta. Nous rangerons dans ce groupe toutes les piles qui n'en diffèrent que par la forme et qui, par conséquent, ont la même force électro-motrice, à condition toutefois qu'il y entre les mêmes substances : zinc, cuivre et acide sulfurique étendu d'eau.

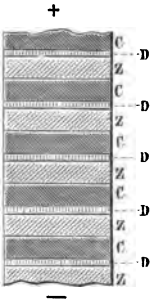
Fig. 20.

I. *Type de Volta* (1800). — L'élément est formé par une rondelle de drap imprégnée d'eau acidulée et placée horizontalement entre un disque de zinc et un disque de cuivre rouge.

Digitized by Google

Les éléments sont empilés dans le même sens, verticalement, en forme de colonne; de là le nom de *pile à colonne* (*fig.* 20). Pour fermer le circuit, on soude un fil de cuivre ou rhéophore à chacun des disques métalliques extrêmes. Nous considérons comme élément l'assemblage zinc-drap-cuivre, et nous regardons le cuivre comme positif dans chaque élément (*fig.* 21).

Fig. 21.



Les inconvénients particuliers à cette pile résultent de ce que :

1° Le liquide ruisselle à la surface de la colonne, ce qui établit des communications entre les éléments, comme si on les réunissait par une infinité de conducteurs allant des uns aux autres dans toutes les directions; par suite, le courant se partage entre tous ces conducteurs, et la décharge électrique par le conducteur principal devient insignifiante.

2° Les rondelles de drap perdent le liquide qui est la cause de l'action chimique; elles se dessèchent rapidement et cessent d'être actives.

3° Le nettoyage et l'entretien sont très longs, car il faut maintenir les surfaces métalliques en bon état.

Nous ne parlons pas des autres inconvénients inhérents au choix des substances qui composent l'élément, parce qu'ils ont été énumérés précédemment. Cette remarque s'applique à toutes les piles comprises dans ce paragraphe.

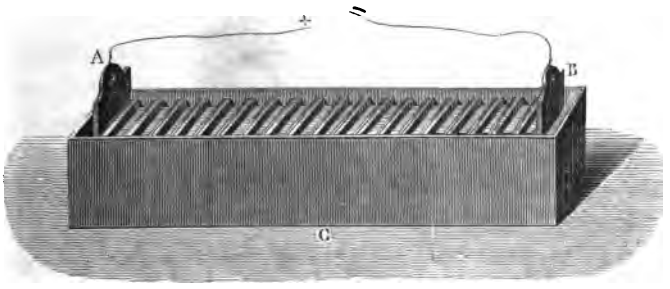
On conclut de ces observations que la pile de Volta ne peut servir que pour une expérience de quelques minutes, avec des

Digitized by Google

rondelles de drap faiblement humectées. Lorsqu'on a besoin d'un nombre considérable d'éléments, plusieurs centaines, pour une expérience de courte durée, on peut avoir recours à cette forme, parce qu'elle est la plus économique.

II. *Pile à auge.* — Une auge de bois est divisée en compartiments par des plaques rectangulaires de cuivre, soudées dans toute leur étendue à des plaques de zinc. Les cuivres sont tournés du même côté, qui est le côté du pôle négatif. On met de l'eau acidulée dans chaque compartiment, sans dépasser le niveau des plaques. On plonge dans le dernier compartiment, où se trouve le côté zinc de la cloison, une lame de cuivre à laquelle est soudé un fil de cuivre, c'est le pôle positif, et dans l'autre compartiment extrême une lame de zinc à laquelle est soudé un fil de cuivre, c'est le pôle négatif (*fig.* 22).

Fig. 22.



Les inconvénients 1° et 2° de la pile à colonne sont évités; les autres persistent.

Cette forme a été imaginée par Cruikshank (*Gilbert Ann.*, t. VII, 1801). Gay-Lussac et Thenard ont employé en 1808 une pile du même système, composée de 600 éléments; chaque plaque métallique avait la forme d'un carré de $0^m,09$ de côté.

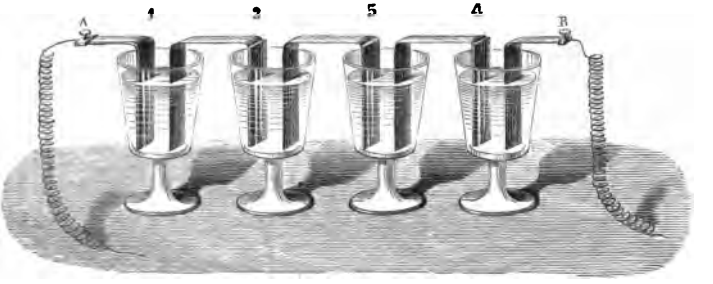
Crahay (*Institut*, 1841) a évité le troisième des inconvénients signalés plus haut en fixant les doubles lames zinc-cuivre à une traverse de bois, qu'on abaisse pour plonger les lames dans l'auge et qu'on élève pour les faire sortir. Mais alors le

Digitized by Google

premier inconvénient subsiste, le liquide faisant communiquer entre eux tous les éléments.

III. *Pile à auges séparées.* — La pile *à couronne de tasses,* imaginée par Volta, se compose de verres contenant le liquide, une lame de cuivre et une lame de zinc. Chaque lame de cuivre est soudée à la lame de zinc du verre suivant (*fig.* 23).

Fig. 23.



Gassiott, ayant besoin d'une pile d'un très grand nombre d'éléments, afin de produire une succession d'étincelles entre les extrémités des rhéophores, disposa 3500 éléments comme les précédents, avec de l'eau ordinaire, et les étincelles se succédèrent pendant plusieurs mois.

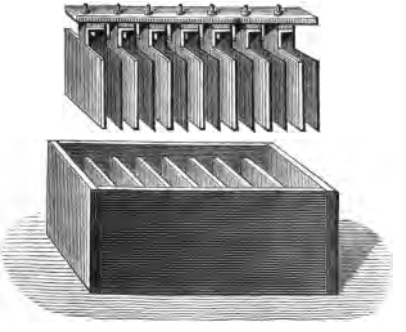
En fixant les lames de métal à une traverse de bois, on peut les séparer rapidement du liquide des bocaux quand on interrompt les expériences, et l'on réalise une pile très commode (*fig.* 24). Elle offre sur les piles précédentes ces avantages, que le nettoyage des lames est plus facile et que l'altération du liquide est plus lente, parce que le volume en est plus grand; aussi ce genre de pile a-t-il été très employé au commencement de ce siècle.

Une des plus célèbres est celle de l'Institut royal de Londres (1806), composée de 2000 éléments dont chaque plaque avait $4^{dq},5$; mais, au lieu d'avoir des bocaux séparés, on se servit d'auges rectangulaires en bois ou en terre, divisées en compartiments par des cloisons parallèles de substance isolante. Cette pile servit aux célèbres expériences de Davy.

Digitized by Google

Wilkinson [*Gilbert Ann.*, t. XXXVI (1810)] et Children [*Philosophical Transactions* (1809 et 1815)] ont fait usage de piles analogues à celles que nous venons de décrire. Cette forme est particulièrement commode quand on veut employer des

Fig. 24.



plaques de grandes dimensions, qui exigeraient des bocaux énormes. La pile de Children de 1815 était composée de 21 éléments dont chaque zinc avait $1^{m},83$ de longueur et $0^{m},81$ de largeur et était placé entre deux lames de cuivre, ce qui rapproche cet élément de celui de Wollaston. Children fondait avec sa pile un fil de platine de $0^{m},45$ de longueur et de $0^{mm},7$ de diamètre.

IV. *Piles en hélice.* — Pour diminuer la résistance de l'élément, on doit augmenter la surface des lames de métal et diminuer l'épaisseur de la couche liquide interposée. La pile à auges de Children est très incommode, à cause de ses grandes dimensions. On a donc cherché à diminuer le plus possible le volume des éléments à grande surface en enroulant en spirale les lames de cuivre et de zinc (*fig.* 25), lesquelles sont séparées par une bande de drap ou des baguettes de bois.

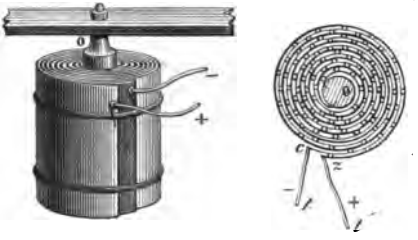
Chaque élément est d'ailleurs plongé dans une auge distincte, en bois ou en terre.

Le principal inconvénient résulte de la difficulté de démonter l'élément pour nettoyer les lames métalliques.

Digitized by Google

L'altération du liquide et la polarisation sont considérables, à cause de l'activité chimique, qui est très grande. Aussi ces piles ne peuvent servir que pendant quelques instants; elles

Fig. 25.



s'échauffent très rapidement; l'eau arriverait à l'ébullition si l'on ne retirait promptement les lames de métal. Leur application est donc presque nulle.

Offershaus [*Gilbert Annalen*, t. LXIX (1821)] enroulait autour d'un cylindre de bois deux feuilles, l'une de zinc, l'autre de laiton, de $3^{m},50$ de long sur $0^{m},41$ de hauteur, en ayant soin de maintenir les deux lames isolées l'une de l'autre au moyen de petites baguettes de bois interposées. Le tout plongeait dans de l'eau acidulée.

Cet appareil à grande surface, et par suite à très faible résistance intérieure, est éminemment propre à montrer des effets d'élévation de température dans des fils métalliques et, en général, dans des circuits peu résistants. De là le nom de *calorimoteur* donné par Offershaus à sa pile, dont les effets calorifiques étaient remarquables à l'époque où elle a paru.

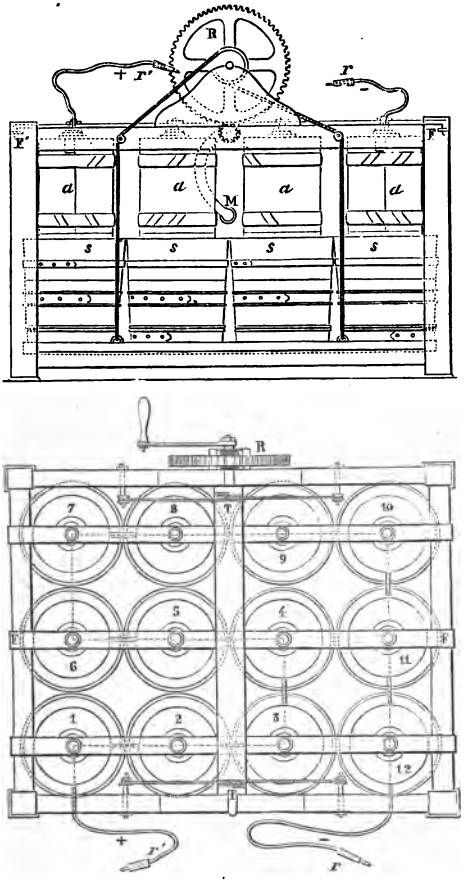
Pepys [*Philosophical Transactions* (1823)] a employé une disposition analogue; il séparait les lames de cuivre et de zinc l'une de l'autre à l'aide de cordes de crin. La surface de chaque lame avait environ 10^{mq}. Le système des deux lames était porté par une corde enroulée sur une poulie et équilibré par un contre-poids, ce qui rendait la manœuvre facile.

Hare [*Silliman Journal*, t. VII; *Philosophical Magazine*, t. LIII (1824); *Annales de Chimie et de Physique*, t. XX (1822)] fit aussi usage d'éléments en hélice. Ayant remarqué que

Digitized by Google

dans les éléments à un liquide l'effet électrique est maximum au moment même de l'immersion, puisqu'il s'affaiblit rapidement par la polarisation une fois que le circuit est fermé, il

Fig. 26.



disposa son appareil de manière à obtenir ce maximum. Toutes les lames de zinc et de cuivre furent suspendues à un châssis, sur une ou deux rangées, de manière à pouvoir être immergées en même temps dans la liqueur acidulée contenue dans des bocaux de verre. L'effet de cet appareil au moment de l'im-

Digitized by Google

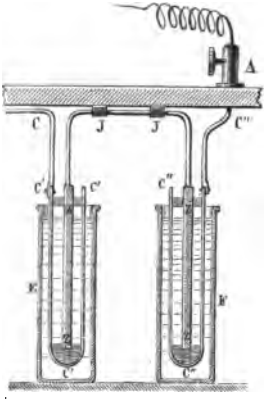
mersion était si intense, comparativement aux effets alors connus, que Hare lui avait donné le nom de *déflagrateur galvanique*.

Pouillet fit construire pour la Sorbonne 12 éléments en hélice, dont les lames avaient 5^{mq} ou 6^{mq} de surface. Les couples étaient fixes; les auges s'élevaient par un treuil quand on voulait établir le circuit voltaïque (*fig.* 26).

V. *Pile de Wollaston* [*Thomson Journal* (1815); *Gilbert Annalen*, t. LXIV (1816)]. — La pile de Wollaston introduit un fait nouveau : c'est la diminution de la résistance par l'augmentation de la surface du cuivre, celle du zinc ne changeant pas. Cette pile a subi diverses modifications de détail, qui ne sont que l'application de la même idée. Elle offre d'ailleurs les avantages et les inconvénients de la pile à auges séparées, dont elle ne diffère que par l'inégale étendue des lames.

La lame de cuivre est repliée en forme d'U autour de la lame de zinc (*fig.* 27); la distance entre les deux lames est maintenue

Fig. 27.



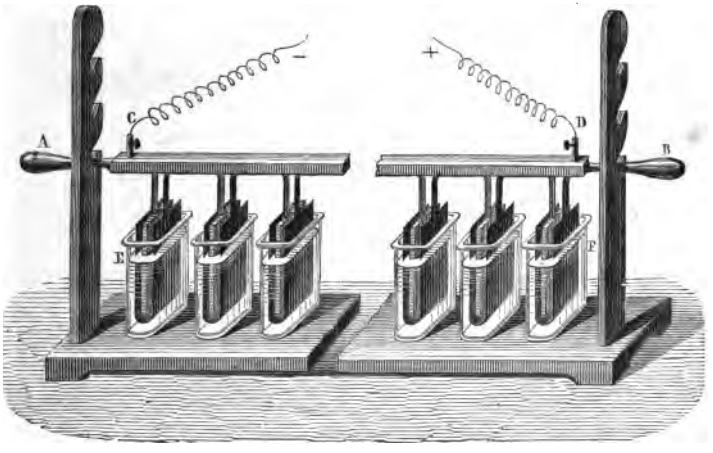
constante au moyen de cales en bois ou en liège. Cette forme a été une des plus usitées parmi toutes celles des piles à un liquide. Elle diminue la résistance environ de moitié.

Habituellement, la lame de cuivre porte une patte qui se re-

Digitized by Google

courbe pour aller se souder à la lame de zinc du couple suivant, et ces pattes sont fixées à une même traverse de bois qui permet de plonger tous les couples à la fois dans l'eau acidulée et de les en retirer aussitôt qu'on n'a plus besoin de la pile (*fig.* 28).

Fig. 28.



L'eau, acidulée au dixième, est contenue dans des vases en verre aplatis, de sorte que la quantité de liquide employée est réduite autant que possible. Il faut remarquer que cette disposition deviendrait mauvaise si la pile devait fonctionner longtemps, car le liquide, étant en petite quantité, serait promptement saturé de sulfate de zinc.

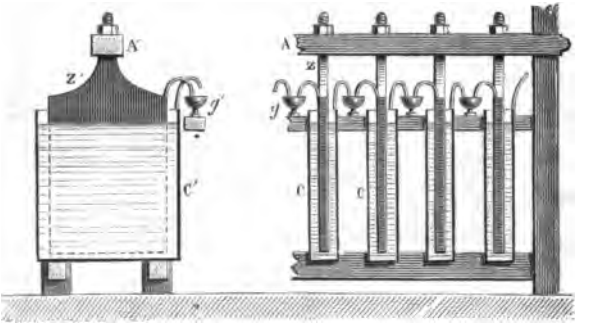
Pour éviter l'emploi de verre, Wollaston conseille de fabriquer des vases avec une feuille de cuivre relevée sur les côtés et dans laquelle on met seulement une lame de zinc. Le premier appareil construit par Wollaston était formé par un dé d'argent aplati, dans lequel était mastiquée, avec de la cire à cacheter, une feuille de zinc de 5^{cq} de surface. L'appareil était chargé avec de l'eau acidulée au cinquantième d'acide sulfurique, et en réunissant le zinc et le dé avec un fil de platine très fin, on le fit rougir.

Berzélius paraît avoir eu la même idée et a fait également usage d'auges en cuivre.

Digitized by Google

La pile d'OErstedt est encore semblable à la précédente. Ce qui la distingue, c'est le mode de réunion des éléments. Les auges en cuivre, étant fixes, communiquent respectivement avec des godets de fer remplis de mercure (*fig.* 29). Les lames de zinc, réunies par une traverse de bois, sont munies de cro-

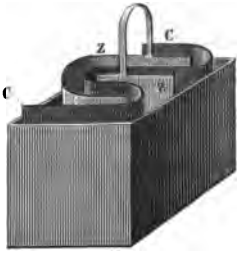
Fig. 29.



chets de cuivre qui plongent dans les godets quand on abaisse la traverse.

Dans la pile de Schmidt [*Traité de galvanisme* de Wiedemann], on diminue la résistance en repliant trois fois sur elle-même la lame de cuivre; dans chaque repli ainsi formé on place une lame de zinc. Le couple se compose donc, comme le montre la *fig.* 30, d'une lame de cuivre repliée trois fois,

Fig. 30.



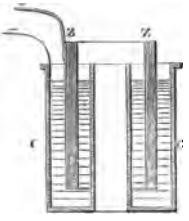
d'une lame de zinc repliée deux fois et d'une dernière lame de zinc simple et réunie à la précédente par une patte qui passe par-dessus le cuivre. Il est évident que par cette disposition

Digitized by Google

l'on obtient un couple de résistance six fois plus faible que celui qui aurait des lames de zinc et de cuivre de même surface, placées à la distance des lames extrêmes de la pile de Schmidt.

Dans un but analogue OErstedt [*Schweigger Journal,* t. XX (1818)] prend un vase annulaire de cuivre contenant l'eau aci-

Fig. 31.



dulée et y suspend sans le toucher un cylindre de zinc. Les deux cylindres portent à leur partie supérieure un petit godet rempli de mercure, dans lequel plongent les rhéophores.

VI. *Pile de Munch* [*Comptes rendus des séances de l'Acamie des Sciences,* t. XIII (1841)]. — On retrouve dans cette pile le principe de Wollaston avec une disposition nouvelle qui rend la pile moins encombrante et diminue la résistance. Tous les autres caractères sont ceux de la pile de Wollaston, avec ce désavantage que l'emploi d'une seule auge permet l'établissement de courants locaux ou dérivations, comme dans la pile à colonne. Cet inconvénient paraît racheté en partie par la diminution de résistance qui résulte du rapprochement des lames. Il est d'ailleurs impossible de nettoyer l'appareil.

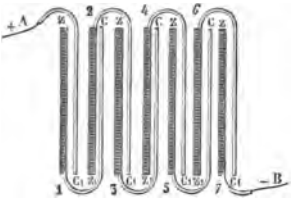
Cette pile se compose d'une série de couples formés par la réunion de plaques rectangulaires de zinc et de cuivre soudées deux à deux. Ces lames sont disposées de telle sorte que le zinc d'un couple soit vis-à-vis du cuivre du couple suivant, toutes les soudures de même ordre étant placées verticalement et sur une même ligne, comme on le voit sur la *fig.* 32; on a ainsi la série des soudures impaires d'un côté et celle des soudures paires de l'autre.

Entre le zinc et le cuivre d'un couple de la première série

Digitized by Google

viennent se placer le cuivre d'un couple de la deuxième série et le zinc du couple suivant. Aux extrémités sont nécessairement d'une part deux cuivres et de l'autre deux zincs. On in-

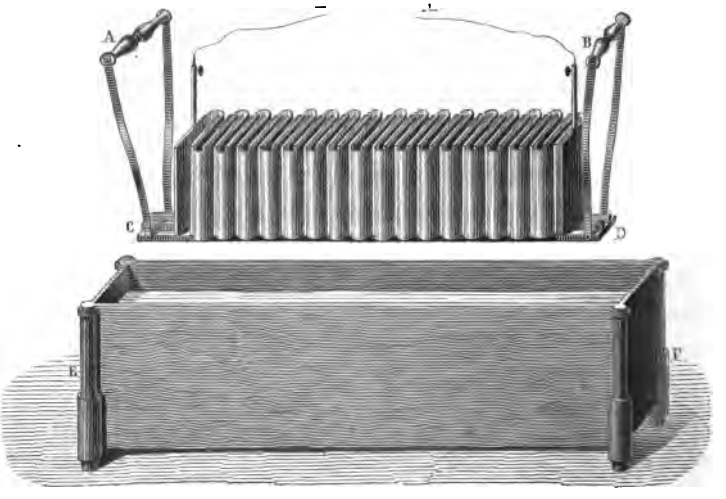
Fig. 32.



terpose une lame de cuivre entre les deux derniers zincs et une lame de zinc entre les deux derniers cuivres: ce sont là les pôles positif et négatif.

Toutes ces lames sont séparées les unes des autres par des morceaux de liège et fixées sur une même planche dans laquelle on a pratiqué des traits de scie pour les maintenir. La planche est munie de deux poignées, de sorte que l'on peut

Fig. 33.



plonger tous les couples ensemble dans l'auge contenant l'eau acidulée et les en retirer dès qu'on a fini de s'en servir (*fig.* 33).

Digitized by Google

Cette pile qui, à part les inconvénients signalés plus haut, présente tous les avantages de la pile de Wollaston, a sur cette dernière une supériorité évidente, grâce à sa construction, à son maniement plus facile et à son petit volume : elle est susceptible d'acquérir une très grande puissance.

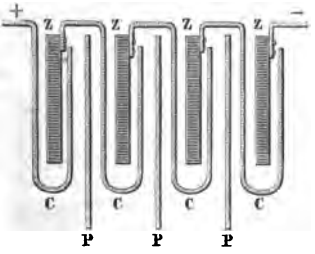
La pile primitive de Munch, formée de 40 couples dont les plaques avaient $0^m,07$ de haut sur $0^m,08$ de large, n'occupait qu'une longueur totale de $0^m,25$ et fonctionnait dans une cuve contenant 3^{lit} d'eau, 150^{cc} d'acide sulfurique et 80^{cc} d'acide azotique.

Elle rougissait un fil de fer de $0^m,001$ de diamètre et de $0^m,13$ de long, donnait une vive lumière entre deux pointes de charbon, et dégageait par minute, au voltamètre, de 60^{cc} à 100^{cc} de gaz tonnant.

C'est évidemment la meilleure de toutes les piles à un liquide où le type primitif de Volta soit conservé. Mais la présence de l'acide azotique dans le liquide ne suffit à empêcher la polarisation que dans les premiers instants, et, au bout de quelque temps, la pile diminue beaucoup de puissance, comme toutes les autres du même genre.

L'élément de Faraday [*Philosophical Transactions* (1835)]

Fig. 34.



se compose d'une lame rectangulaire de zinc Z soudée à une autre de cuivre C recourbée en U (*fig.* 34); entre les deux branches de cette lame de cuivre s'engage la lame de zinc du couple suivant. On obtient ainsi une série de couples qu'on peut réunir tous à une même traverse et faire plonger en-

Digitized by Google

semble dans une auge de bois verni ou de porcelaine remplie d'eau salée ou acidulée. Ce n'est donc, en résumé, qu'une pile de Wollaston dont tous les éléments sont réunis pour plonger dans le même vase.

Il y avait à cette disposition un inconvénient, c'est que les cuivres de deux éléments consécutifs étaient vis-à-vis l'un de l'autre et très rapprochés, de sorte qu'il pouvait s'établir entre eux des dérivations qui nuisaient au courant principal. Faraday obvia à cet inconvénient en séparant les cuivres par une feuille de fort papier verni P.

Cependant l'inconvénient existait encore, car Van Melsen [*l'Institut*, t. IX (1841)] a obtenu avec cette disposition un courant plus fort en remplaçant les feuilles de papier par des lames de verre. En même temps, Van Melsen a employé le zinc amalgamé, ce qui lui donna un nouvel avantage, comme on le verra dans le paragraphe suivant.

Young [*Philosophical Magazine*, t. X (1837) et *Poggendorff's Annalen*, t. XL (1837)] recourbe à la fois les lames de zinc et celles de cuivre, de façon que les deux métaux alternent régulièrement. Les courbures sont d'ailleurs échancrées, afin de pouvoir laisser passer au-dessus du niveau de l'auge les pattes qui relient les lames les unes aux autres.

Fig. 35.

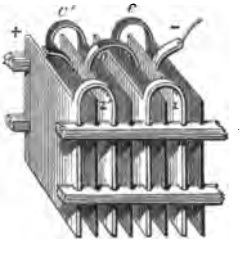
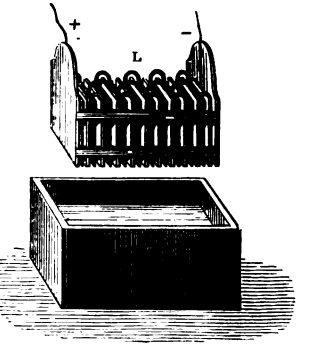


Fig. 36.



Chaque couple se compose de deux lames de zinc et de deux lames de cuivre dont la *fig.* 35 représente la disposition; la

Digitized by Google

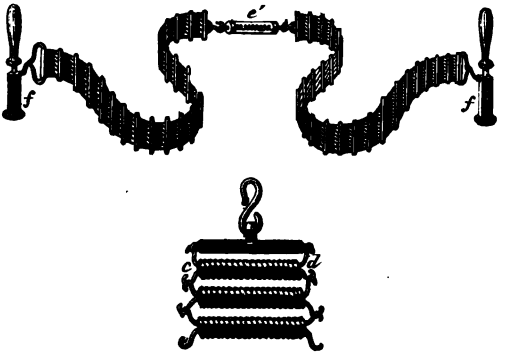
fig. 36 montre l'ensemble de la pile portée par un châssis en bois qui permet de plonger à la fois tous les couples dans le liquide.

Breton [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. XLII (1856); *Archives de Genève,* t. XXXII] propose une pile toujours humide destinée aux usages médicaux.

Dans un vase extérieur on met un mélange de poudre de zinc, et d'une poudre inerte, de la sciure de bois par exemple, et l'on place au milieu un vase poreux qui contient un mélange de poudre de cuivre et de sciure de bois. Ces deux mélanges sont imbibés d'une dissolution saturée de chlorure de calcium qui les maintient toujours humides. On obtient ainsi une pile constamment prête à fonctionner et suffisamment forte pour les usages de la Médecine. On peut disposer un grand nombre d'éléments sous un petit volume en séparant un vase par des cloisons poreuses et mettant dans chaque compartiment alternativement les deux mélanges de poudres.

Pulvermacher appelle *chaîne galvanique* [*Comptes rendus*

Fig. 37.



des séances de l'Académie des Sciences, t. XLV (1857)] une pile ayant la forme d'une ceinture flexible, que l'on peut enrouler autour du corps pour les applications physiologiques. Chaque élément est formé par un fil de zinc et un fil de cuivre enroulés en spirale sur un petit cylindre de bois, sans se tou-

Digitized by Google

cher. Pour cela le bois est creusé de rainures, dans lesquelles sont enroulés les deux fils. Le fil de zinc d'un élément communique avec le fil de cuivre de l'élément suivant, par une articulation flexible (*fig.* 37). Pour employer cette pile on la plonge dans du vinaigre étendu d'eau, le bois s'imprègne d'eau et joue le rôle des rondelles de drap dans la pile à colonnes.

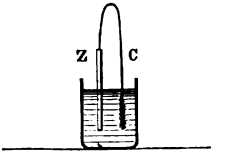
On emploie le plus souvent cette pile en médecine en l'appliquant sur la peau; on peut aussi lui faire donner des commotions à l'aide de dispositions spéciales.

§ II. — Améliorations dont ces piles sont susceptibles.

Sans changer les formes des piles précédemment décrites, on peut les améliorer de deux manières différentes, d'une part en amalgamant les lames de zinc, d'autre part en introduisant dans l'eau diverses substances pour diminuer la polarisation ou rendre la résistance plus constante.

1° *Emploi du zinc amalgamé.* — Kemp a reconnu que l'amalgame de zinc ne décompose pas l'eau acidulée, quand il est simplement placé dans un sac de toile et plongé dans le liquide, tandis que, réuni à ce liquide par un fil métallique, il donne lieu à l'action chimique qui engendre le courant [*Edinburgh Journal* (1828)]. On démontre encore ce fait en adaptant à une lame de zinc, amalgamée simplement à la surface, un fil de cuivre (*fig.* 38), et plongeant le zinc dans un

Fig. 38.



vase d'eau acidulée. Tant que le fil de cuivre reste hors du liquide, il n'y a pas d'action chimique appréciable, tandis qu'en plongeant l'extrémité libre du fil de cuivre dans l'eau, on voit

Digitized by Google

des bulles gazeuses se produire et se dégager sur le cuivre. Elles sont formées par l'hydrogène de l'eau; quant à l'oxygène, il se combine avec le zinc, comme si le mercure n'existait pas.

Le rôle du mercure est d'empêcher le zinc de former une infinité de petits éléments voltaïques partout où il y a quelque corps étranger mêlé au métal. Ce qui le prouve, c'est que le zinc pur se comporte comme le zinc amalgamé. Mais le prix élevé de ce métal, quand il est pur, rend le procédé de Kemp très précieux.

Grâce à ce perfectionnement, la pile de Volta ne s'use pas sensiblement quand le circuit est ouvert. L'action chimique n'a lieu que lorsque l'on a besoin du courant, ce qui diminue la rapidité de l'altération du liquide, et procure une économie sérieuse. La force électro-motrice paraît être un peu augmentée.

Pour amalgamer une lame de zinc, il faut la plonger pendant quelques instants dans de l'eau mêlée de $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique en volume, puis la frotter avec une brosse de fils de cuivre imprégnés de mercure. On peut aussi l'immerger dans le mercure quand la disposition de la pile le permet. C'est Sturgeon qui paraît avoir employé le premier le zinc ainsi préparé [*Experimental researches on electromagnetism* (1830); *Annales électriques de Sturgeon*, t. VII (1841)].

On peut toujours construire la pile avec des lames de zinc amalgamé, mais, comme il faut renouveler le mercure de temps en temps, certaines formes de pile ne permettent pas cet entretien; telles sont les piles de Wollaston, de Munch, de Faraday.

Demance a reconnu qu'on peut amalgamer les zincs d'une pile montée en mettant au fond du vase qui renferme chaque élément un peu de mercure, de façon que le zinc touche ce liquide. L'amalgamation se fait d'elle-même sous l'influence du courant. Ce procédé ne s'applique pas d'ailleurs à toutes les piles; il faut que le zinc touche seul le fond du vase où se trouve le mercure (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXV).

Digitized by Google

2° *Modifications diverses du liquide excitateur.* — Dans toutes les piles précédentes, quand le zinc n'est pas amalgamé, on peut diminuer le dégagement d'hydrogène sur la lame de zinc en ajoutant un peu d'acide azotique à l'eau contenant déjà de l'acide sulfurique.

L'hydrogène que l'action locale du zinc produit en dehors de l'action voltaïque réagit sur l'acide azotique et donne de l'ammoniaque. Dès lors, de l'azotate et du sulfate d'ammoniaque se forment et se mêlent au sulfate de zinc, sans autre inconvénient que de changer un peu la force électro-motrice et la résistance. L'activité du courant se ralentit moins rapidement quand on prend cette précaution, mais la polarisation n'est pas évitée. Cette addition d'acide azotique est inutile lorsque le zinc est amalgamé.

Nous allons maintenant passer en revue divers systèmes liquides qui ont pour but de diminuer la polarisation, mais qui cependant ne la rendent pas négligeable.

Pour diminuer la polarisation dans les piles de Volta, Warren de la Rue [*Philosophical Magazine*, t. X (1837); *Poggendorff's Annalen*, t. XL (1837)] emploie comme liquide excitateur une dissolution de sulfate de cuivre.

Ce liquide donne une force électro-motrice un peu moins grande que l'acide sulfurique; il se forme de plus sur le zinc des dépôts de cuivre qui sont nuisibles de deux façons : d'abord parce qu'ils diminuent la surface attaquable du zinc, et surtout parce qu'ils forment avec ce dernier un couple donnant naissance à des courants secondaires qui usent le zinc en pure perte et sans le moindre effet extérieur.

Il en est de même pour la pile de Fyfe [*Philosophical Magazine*, t. XI (1837)], formée de lames de zinc et de fer plongeant dans un mélange de sulfate de cuivre, de salpêtre et de sel marin.

On a proposé également, pour détruire la polarisation, de remplacer l'eau acidulée sulfurique par une dissolution d'acide chromique, qui peut être réduit par l'hydrogène. Cette substitution augmente la force électro-motrice de la pile dans le rapport

Digitized by Google

de 1,2 à 1. Mais, outre que l'acide chromique est un produit très-coûteux, il ne suffit pas pour empêcher la polarisation et rendre la pile constante.

Desbordeaux [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XIX (1844)] a cherché à rendre l'élément de Wollaston constant, en prenant comme liquide excitateur une dissolution de sulfate de zinc contenant un peu de sulfate de cuivre et d'acide sulfurique. On ajoute de temps en temps une petite quantité de ces deux derniers produits.

La polarisation est effectivement évitée de cette façon, mais la force électro-motrice est un peu moins grande qu'avec l'acide sulfurique seul. D'un autre côté, le cuivre qui se dépose sur le zinc forme avec lui des piles locales qui augmentent beaucoup l'usure du zinc sans accroître en rien l'intensité du courant.

De Fonvielle et Dehérain [*l'Institut*, t. XXVI (1858)] ont essayé dans la pile zinc-cuivre à un liquide de l'eau oxygénée, comparativement à de l'eau aiguisée de $\frac{1}{10}$ d'acide chlorhydrique. Ils ont toujours obtenu un renforcement notable du courant; mais l'augmentation de l'intensité n'était pas proportionnelle à celle de la richesse de l'eau en oxygène.

Quant à l'acide chlorhydrique, il ne prévient aucunement la polarisation, comme l'a montré M. Le Blanc; on sait du reste que l'hydrogène n'a pas d'action sur l'acide chlorhydrique.

Kemp [*Edinburgh Journal* (1828)] a employé un amalgame de zinc, renfermé dans un vase poreux qui plonge dans le vase extérieur contenant une dissolution de sulfate de cuivre, et un cylindre de cuivre. Cette disposition ne paraît pas annuler la polarisation; de plus, elle introduit dans la pile une résistance considérable et les constantes de l'élément ainsi formé varient beaucoup suivant la nature du vase poreux.

Fechner [*Maasbestimmungen* (1831)] propose d'enduire le côté du cuivre tourné vers le zinc d'une dissolution de sel ammoniac ou de foie de soufre et de laisser cette lame ainsi exposée quelques heures à l'air. Il se forme un enduit de chlorure ou de sulfure de cuivre qui, en se dissolvant peu à peu dans le sel ammoniac ou l'eau acidulée, laisse la surface du cuivre un

Digitized by Google

peu rugueuse. Du reste, ce sel, une fois dissous, est réduit par l'hydrogène et donne encore un nouveau dépôt rugueux de cuivre qui facilite le dégagement de l'hydrogène quand le sel de cuivre est entièrement réduit et ne peut plus l'absorber.

Bagration [*Archives de l'Électricité*, t. IV; *l'Institut* (1844)] se sert d'un pot à fleurs plein de terre humectée de sel ammoniac et y plonge vis-à-vis l'une de l'autre une lame de zinc et une de cuivre. Pour éviter la polarisation, on a trempé d'abord le cuivre dans du chlorhydrate d'ammoniaque, puis on l'a séché à l'air. On obtient ainsi une pile assez constante, surtout au bout de quelque temps, mais peu énergique. On s'en est cependant servi autrefois pour la galvanoplastie. Elle a même été un instant assez recommandée : elle est, en effet, beaucoup plus constante que la pile à un liquide ordinaire, et elle présente cet avantage qu'on peut en faire varier à volonté la résistance, en rapprochant ou éloignant l'une de l'autre les deux lames métalliques.

Au système précédent se rattachent les piles à sable et à un seul liquide, qui ont l'avantage d'être transportables et qui conviennent à la télégraphie militaire. On s'en est aussi servi sur les lignes télégraphiques.

Dans la pile de Cooke, qui a été employée en Angleterre à une certaine époque, une auge de bois est divisée en cellules par des cloisons d'ardoise, et les parois sont recouvertes de ciment ou de glu marine. Les plaques de cuivre et de zinc sont réunies entre elles comme celles de la pile à couronne de tasses. Dans chaque cellule se trouve du sable imbibé du liquide excitateur (eau et acide sulfurique).

Brett et Little ont amélioré cette pile, en 1847, en disposant un courant d'eau acidulée qui s'écoule goutte à goutte d'une manière continue à travers le sable. On évite par là la polarisation et les efflorescences salines.

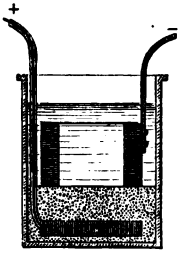
Mœnig a remplacé le sable par un mélange d'amidon et de diverses poudres, oxydes, sels métalliques. Quand on l'arrose avec le liquide excitateur, on a un courant d'autant plus intense que la pâte est plus poreuse.

Digitized by Google

Dans l'élément de Weare, la lame de cuivre et la lame de zinc sont recouvertes de plâtre et forment avec un cadre de bois une auge, où l'on tasse de la paille hachée, ou du carton en pâte non durcie, qui joue le rôle du sable des piles précédentes.

Roudel [*Cosmos*, t. XVI (1860); *Fortschritte* (1860)] dispose horizontalement, au fond d'un vase de terre, une plaque en cuivre ou en laiton à laquelle est soudée une lame verticale de même métal, servant de pôle positif (*fig.* 39); cette lame est garnie d'un enduit isolant sur toute la portion qui est plongée dans le vase. On recouvre la plaque horizontale de cuivre d'une bouillie d'argile préparée avec l'argile de potier ne faisant pas effervescence dans les acides, séchée, broyée, séchée de nouveau vers 40° ou 50°, puis pétrie avec de l'acide chlorhydrique en pâte homogène peu résistante. Au-dessus est placé un cy-

Fig. 39.



lindre de zinc amalgamé, muni d'une patte de cuivre; le vase est ensuite rempli d'acide chlorhydrique du commerce, étendu de cinq fois son poids d'eau.

On obtient ainsi une pile qui a paru constante à l'auteur, et qui produit une dissolution de chlorure de zinc pouvant marquer de 20° à 30° au pèse-sels, c'est-à-dire immédiatement utilisable dans l'industrie.

La *pile à triple contact* de Selmi [*Nuovo Cimento*, t. IV; *Archives de Genève*, t. XXXIII (1856)] se compose d'une longue lame de cuivre enroulée en spirale plate et suspendue horizontalement aux bords d'un vase de 1^{lit} de capacité;

Digitized by Google

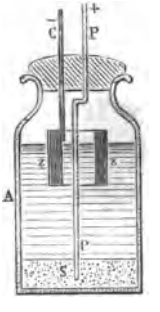
au-dessous on dispose une lame de zinc non amalgamé horizontale, puis on remplit le vase d'une dissolution de sulfate de potasse, de manière que la spirale de cuivre n'y plonge que par quelques millimètres de sa partie inférieure. Le courant est assez constant pendant plus d'un mois, mais faible; la pile est donc applicable surtout à la dorure ou à la galvanoplastie.

L'auteur lui donne le nom de *pile à triple contact* parce qu'il attribue sa constance et son efficacité aux actions réunies du cuivre, du sulfate de potasse et de l'air. En effet, la couche supérieure du liquide peut dissoudre de l'oxygène, qui agit comme réducteur, de la même manière que l'acide azotique de la pile Bunsen.

Le sulfate de potasse se régénère indéfiniment, et il se dépose simplement de l'oxyde de zinc, parce que la potasse mise en liberté précipite l'oxyde de zinc du sulfate, à mesure que ce dernier prend naissance.

Entre toutes les piles à un seul liquide, la pile Blanc-Filipo [*les Mondes*, t. VII (1865)] est assez remarquable par la constance et la durée de son courant. Elle est formée (*fig.* 40) par

Fig. 40.



un flacon de verre A à large ouverture, au fond duquel on met une couche S de soufre en poudre; par-dessus on verse de l'eau chargée de chlorure de sodium, dans laquelle on a délayé un peu de soufre finement pulvérisé. Le bouchon du flacon laisse passer deux tiges métalliques: l'une C, de cuivre, est soudée à un anneau Z, de zinc, qui plonge dans l'eau salée; l'autre P est

Digitized by Google

une tige de plomb isolée jusqu'au point où elle entre dans la couche de soufre et recouverte en dessous de ce point de sulfure de cuivre. Le pôle positif se forme sur le plomb, et le pôle négatif sur le zinc et le fil de cuivre.

Cette pile est remarquable par la longue durée de son action, la petite dimension des couples et par son économie, qui résulte à la fois de la nature des substances employées et de leur faible quantité.

Voici comment on a présenté les actions chimiques qui s'y produisent. La décomposition de l'eau donne de l'oxyde de zinc et de l'hydrogène; ce dernier, au contact du soufre, se transforme en acide sulfhydrique, lequel réagit sur le chlorure de sodium pour donner de l'acide chlorhydrique et du sulfure de sodium. L'acide chlorhydrique produit avec le zinc un dégagement d'hydrogène gazeux et du chlorure de zinc qui réagit sur le sulfure de sodium : il se forme alors du sulfure de zinc insoluble, et le chlorure de sodium est régénéré.

Quelle que soit la véritable théorie de ces réactions, le résultat final est la production de quantités équivalentes d'hydrogène, d'oxyde de zinc et de sulfure de zinc. Quant au sulfure de cuivre qui recouvre le plomb, on a reconnu que sa présence était indispensable, mais son action n'est pas bien expliquée jusqu'ici.

Matteucci [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LX (1865)] a repris l'étude de la pile Blanc pour analyser l'action du soufre et est arrivé aux résultats suivants.

Le soufre, de même que le chlore, le brome ou l'iode, n'agit qu'au contact du métal électro-négatif, plomb, cuivre ou platine, comme l'avaient déjà constaté Becquerel et Grove pour le chlore, le brome et l'iode.

Pour qu'il y ait action, il faut que l'élément électro-négatif, plomb, platine, fer ou argent, soit recouvert d'une couche très mince d'un métal, et principalement de cuivre. Il faut également, pour le bon fonctionnement de la pile, que le liquide contienne du sel marin ou un autre sel de soude, ou probablement encore une base alcaline quelconque.

Digitized by Google

Le soufre divisé mis au contact du métal électro-négatif augmente notablement la force électro-motrice, la constance et la durée de la pile; quoique insoluble et isolant, il entre en combinaison avec le sodium rendu libre par le courant électrique pour former transitoirement du sulfure de sodium.

Il reste à expliquer l'action exercée par une quantité très petite de sulfure de cuivre dans ces phénomènes, action qui paraît indispensable sans que l'on puisse s'en rendre compte.

§ III. — Piles a charbon positif.

Le prix élevé du cuivre a fait songer à remplacer ce conducteur par un autre corps conducteur : il suffit que le liquide n'exerce pas d'action chimique sur cette substance, et l'autre partie de l'élément reste formée par le zinc. L'un des corps auxquels on a le plus vite songé et qui convient le mieux est le charbon.

La substitution du charbon au cuivre, dans un élément donné, augmente la résistance. Il importe donc que le charbon soit convenablement préparé pour qu'il soit bon conducteur. Le meilleur est celui que l'on connaît sous le nom de *charbon de cornues;* il se trouve comme résidu de la houille dans les cornues où l'on prépare le gaz d'éclairage. On le travaille aisément et on lui donne la forme de lames, de cylindres ou de prismes.

Autrefois on a employé du charbon réduit en poudre et chauffé avec de la mélasse, ce qui fournit une matière assez résistante, mais inférieure au charbon de cornue.

Le principal effet du charbon est de diminuer la polarisation, parce que l'hydrogène et le zinc du sel qui se forme ne se déposent pas aisément sur cette substance.

L'emploi du charbon a été depuis longtemps proposé pour remplacer le cuivre. Nous passerons en revue les essais auxquels on s'est livré à ce sujet, en suivant autant que possible l'ordre chronologique. Mais, d'après notre classification, nous

Digitized by Google

n'examinerons ici que les piles à charbon où la polarisation n'est pas évitée par le choix de substances convenables, liquides ou solides.

Le prince M. de Leuchtenberg [*l'Institut*, t. XIII (1845)], qui avait monté à Saint-Pétersbourg un atelier de galvanoplastie, trouvant que pour les grosses pièces la pile Daniell devenait d'un emploi difficile, a fait usage de couples à un seul liquide, fer et charbon, plongeant dans de l'eau acidulée sulfurique. Cette pile dorait avec une grande rapidité.

Stöhrer [*Poggendorff's Annalen*, t. LXXVII (1849)] emploie comme liquide excitateur une dissolution d'alun ; les électrodes sont des lames de charbon et de zinc non amalgamé et plongent soit dans le liquide même, soit dans du sable humecté de la dissolution saline.

Il vaut encore mieux prendre une pile cloisonnée ; pour cela, on remplit un premier vase de fragments de coke, dont quelques-uns sont attachés à des fils de cuivre qui se réunissent pour former le pôle positif ; au centre est un vase poreux rempli de sable, dans lequel est enfoncée la lame de zinc non amalgamé. Enfin, dans les deux vases on verse la dissolution d'alun.

L'auteur prétend que sa pile est excellente pour le télégraphe à aiguille ; mais il avoue lui-même qu'elle devient inférieure pour tout autre usage, et notamment quand il y a une grande résistance à vaincre.

M. Helm (Niaudet, *Pile électrique*, p. 70) fait usage, pour actionner les pendules électriques, d'une pile analogue à celle de Stöhrer ; les électrodes sont un cylindre de charbon et une plaque de zinc. Quant au liquide, au lieu de prendre simplement une dissolution d'alun, comme Stöhrer, il emploie un mélange de sel marin et d'alun.

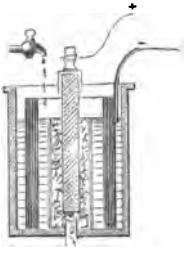
Fabre de Lagrange [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXXIV (1852), et *Philosophical Magazine*, 4e série, t. IV] cherche à éviter la polarisation en mettant le liquide en mouvement.

Le vase extérieur, de terre, contient comme d'habitude le

Digitized by Google

cylindre de zinc ; un robinet y laisse tomber goutte à goutte l'eau acidulée. Celle-ci finit par déborder et passe par-dessus les bords du diaphragme, formé ici de toile à voile et plein de morceaux de charbon tassés autour de la baguette centrale, également en charbon, qui sert d'électrode positive. Enfin, l'eau acidulée s'écoule par un tube qui part du bas du diaphragme et traverse le fond du vase extérieur. Il est commode de prendre pour vase extérieur un pot à fleurs vernissé (*fig.* 41).

Fig. 41.



Grâce à ce mouvement continuel de l'acide, la polarisation est diminuée; mais la complication relative des dispositions rend très difficile en pratique l'usage de cette pile.

Walker [*Philosophical Magazine,* 4e série, t. XVIII (1859)] emploie depuis 1849, pour la télégraphie, une pile formée de lames de zinc et de charbon de cornue enfoncées simplement dans du sable imbibé d'eau acidulée sulfurique. On obtient encore un meilleur effet en platinant le charbon par le procédé que Smée a indiqué pour platiner ses lames d'argent (*voir* p. 123).

Dans la pile de Breguet et dans celle de Fortin, le zinc est immergé dans une solution de sel ammoniac, et le charbon, taillé en prisme, est placé dans un vase de porcelaine poreuse et entouré de charbon de cornue concassé.

Devos a partagé le vase en deux compartiments par une lame de charbon. Dans un des compartiments se trouve le zinc, dans l'autre un mélange de coke concassé et de sel ammoniac. On remplit les deux compartiments d'eau; la cloison de charbon

Digitized by Google

reçoit le rhéophore positif. La force électro-motrice de cette pile est à peu près celle de l'élément Daniell. Elle paraît convenir aux usages télégraphiques et aux sonneries.

Torreggiani [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXII (1866)] a constaté qu'une pile ayant comme pôle négatif du plomb métallique, comme pôle positif du charbon et contenant comme liquide excitateur une dissolution d'acétate alcalin, donne une grande quantité de carbonate de plomb assez pur, outre l'électricité qui peut être utilisée. L'auteur indique cet appareil pour préparer la céruse facilement et sans dangers.

Bœttger [*les Mondes*, t. XVI (1868)] place dans un vase isolant un cylindre de zinc amalgamé, au centre la baguette de coke, et entre les deux un mélange en parties égales de chlorure de sodium et de sulfate de magnésie cristallisés, que l'on mouille d'une forte dissolution des deux sels.

Cette pile donne des courants peu intenses, mais qui sont assez constants et de très longue durée. Elle convient donc très bien pour les sonneries et surtout pour les horloges électriques.

Zaliwski-Mikorski [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVIII (1869)] propose une pile à un liquide formée de lames de charbon et de cuivre qui plongent dans un mélange d'acide sulfurique et d'acide azotique étendus d'eau.

Dans la bouée électrique de Duchemin, un cylindre de charbon et une lame de zinc sont fixés à un flotteur et immergés dans la mer; c'est donc simplement l'eau de mer qui remplit le rôle de liquide excitateur.

Dans la pile à chapelet de Palagi, un vase assez élevé, tel qu'une éprouvette de verre, contient une lame de zinc et une chaîne de grains de charbon, réunis les uns aux autres par des fils de cuivre, ce qui lui donne l'apparence d'un chapelet. Le liquide excitateur est de l'eau ordinaire, légèrement salée.

Digitized by Google

§ IV. — Piles a fer positif.

On a essayé de substituer au cuivre de l'élément de Volta le fer ou la fonte. Outre l'économie, puisque le fer est moins cher que le cuivre, ce qui d'ailleurs a peu d'importance, la lame positive ne devant pas s'user, l'avantage qu'on pouvait attendre résulte de ce que la force de polarisation par l'hydrogène paraît moindre avec le fer qu'avec le cuivre; mais, pour que cet avantage subsiste, il faut que le liquide n'exerce pas d'action chimique sur le fer et qu'il agisse sur le zinc comme dans la pile de Volta. Cette condition est très difficile à remplir, parce que le zinc et le fer ont des affinités chimiques analogues.

Sturgeon [*Annals of Electricity*, t. V; *Poggendorff's Annalen*, t. LI (1840)] se sert d'une pile à un liquide, zinc-fer. Il prend pour vase extérieur un vase de fonte de $0^m,25$ de haut et de $0^m,08$ de diamètre, et le remplit d'eau acidulée au huitième, dans laquelle plonge un cylindre de zinc amalgamé.

Avec des conducteurs courts le courant de ces éléments est plus fort que celui d'un élément cuivre-zinc de mêmes dimensions; mais c'est le contraire qui arrive si l'on emploie des conducteurs longs et résistants. Cette particularité peut s'expliquer de la manière suivante :

D'après Poggendorff, la force électro-motrice de l'élément zinc, fer et eau acidulée sulfurique ne serait que la moitié environ ($\frac{786}{1576}$) de celle de l'élément zinc-cuivre, avant le commencement de la polarisation. Mais ce rapport peut se renverser si le courant augmente d'intensité, c'est-à-dire si l'on emploie un circuit moins résistant, car la force électro-motrice de polarisation de l'hydrogène est moindre sur le fer que sur le cuivre.

Sturgeon a proposé de laisser se rouiller l'intérieur du vase de fonte avant de l'employer, car l'hydrogène, se portant sur la rouille, la réduit, ce qui empêche la polarisation au moins pendant les premiers instants.

Münnich [*Poggendorff's Annalen*, t. LXXVII (1849)] ob-

Digitized by Google

tient une diminution de la polarisation en employant le fer amalgamé. On obtient ce dernier en frottant longtemps une plaque de fer avec du papier de verre et quelques gouttes de mercure et d'acide sulfurique étendu, ou en laissant séjourner le fer dans une dissolution d'un sel de mercure, ou dans du mercure sur lequel on a versé de l'acide sulfurique étendu.

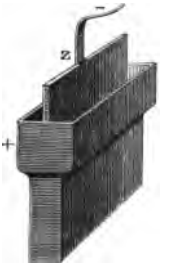
Bœttger obtient le fer amalgamé en chauffant le fer dans un vase de porcelaine avec un mélange de 12 parties de mercure, 1 de zinc, 2 de sulfate de fer, 12 d'eau et 1 $\frac{1}{2}$ d'acide chlorhydrique.

Callan [*Philosophical Magazine*, t. IX (1855); *Archives de Genève*, t. XXIX (1855)] emploie un vase de fonte servant lui-même d'électrode positive. Ce vase contient un liquide acide dans lequel plonge la lame de zinc amalgamé formant le pôle négatif.

Quant à l'acide, on prend l'un des suivants : acide chlorhydrique pur ou peu étendu; acide sulfurique étendu de deux à trois fois son volume d'eau; acide sulfurique mélangé de trois fois son poids d'une solution concentrée de sel marin. Aux deux premiers liquides il est bon d'ajouter un peu de sulfate de soude qui préserve le zinc amalgamé et en maintient la surface propre.

Pour diminuer la quantité de liquide et en même temps rapprocher autant que possible les deux métaux, l'auteur em-

Fig. 42.



ploie un vase rectangulaire, aplati et rétréci à sa partie inférieure, comme l'indique la *fig.* 42.

Digitized by Google

Callan se sert encore de vases de terre dans lesquels plongent des lames de fonte et de zinc amalgamé, que l'on monte sur une traverse de bois, comme dans la pile de Wollaston.

L'auteur affirme que sa pile est plus puissante que la pile Bunsen et bien constante. Le zinc reste propre jusqu'à son usure complète, et il n'y a pas d'hydrogène adhérent sur le fer si l'on a soin de ne pas rapprocher outre mesure les deux métaux. La principale cause d'affaiblissement est l'épuisement assez prompt du liquide excitateur. On peut, du reste, y remédier en vidant les auges avec un siphon, pour les remplir de nouveau quand cela est devenu nécessaire.

Cette pile a surtout été préconisée par son auteur pour la lumière électrique. Une pile de 70 éléments, dont les auges n'avaient que $0^{m},10$ de côté, donnait, dans la lampe électrique de Deleuil, une lumière extrêmement vive et à très bon marché, car la quantité d'acide nécessaire pour charger la pile entière ne revenait pas à plus de 1^{fr}.

D'après Callan, auquel nous laissons la responsabilité des renseignements suivants, un élément à vase rectangulaire de fonte donne au galvanomètre une déviation presque double de celle d'un élément Bunsen de mêmes dimensions. [*Archives de Genève,* t. XXIX (1855).]

La lumière est plus intense que celle que produirait le même nombre d'éléments de Bunsen, toutefois l'arc voltaïque est moins long.

Un fait curieux est qu'avec cette pile les deux pointes de charbon paraissent également incandescentes, tandis qu'avec la pile ordinaire presque toute la lumière semble provenir de la pointe positive.

§ V. — Piles a lame positive déshydrogénée.

On peut empêcher l'hydrogène d'adhérer à la lame positive de l'élément par divers procédés. On diminue de cette manière la force de polarisation, et la pile varie moins rapidement.

Digitized by Google

Poggendorff [*Poggendorff's Annalen,* t. LI (1840)] donne plus de force et de stabilité au courant des piles galvaniques à un liquide en traitant le cuivre de la manière suivante :

1° On le chauffe à l'air jusqu'à ce que les couleurs qui se forment d'abord aient disparu.

2° On le plonge dans l'acide azotique, puis on le lave à l'eau.

3° On y précipite au moyen de la pile un dépôt de cuivre pulvérulent analogue à celui qui se forme sur le cuivre de l'élément Daniell.

Avec l'une ou l'autre de ces précautions, on obtient une pile dont le courant croît d'abord, atteint un maximum, puis décroît, mais bien plus lentement que dans la pile ordinaire à un liquide.

C.-G. Page [*Dingler Journal,* t. CXXIV ; *Fortschritte* (1852)] prend simplement la pile de Volta à couronne de tasses ; mais, pour empêcher le dépôt d'hydrogène sur le cuivre, il perce ce dernier de trous ou le recouvre d'un dépôt galvanique de cuivre rugueux.

Enfin C.-V. Walker emploie également une lame rugueuse de cuivre obtenue en recouvrant une lame de cuivre d'un dépôt galvanique du même métal dans une solution qu'on laisse s'épuiser presque complètement.

Smée [*Philosophical Magazine,* t. XVI (1840)] diminue la force électro-motrice de polarisation dans la pile à un liquide en remplaçant la lame de cuivre par une lame de platine platiné, ou mieux d'argent platiné. Pour l'obtenir, on met un peu de bichlorure de platine dans de l'eau acidulée, et l'on décompose la solution au moyen d'un conducteur de platine fixé au pôle positif d'une pile dont le pôle négatif communique avec la lame à platiner. On obtient de la sorte un dépôt qui présente de petites aspérités et rend le dégagement de l'hydrogène plus facile.

On donne à ce couple une disposition analogue à celle de la pile de Wollaston, en plaçant la feuille d'argent platiné entre deux lames de zinc communiquant entre elles (*fig.* 43).

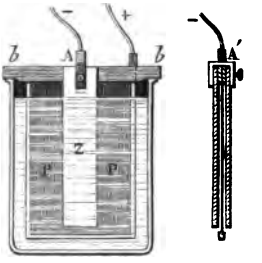
La pile de Smée a joui longtemps en Angleterre d'une grande

Digitized by Google

faveur; elle a été très employée pour la galvanoplastie et même pour la télégraphie transatlantique.

Cette disposition présente un inconvénient, car, la plaque

Fig. 43.



d'argent étant placée entre les deux lames de zinc, le gaz monte entre les deux plaques du couple, ce qui oblige à laisser entre elles une certaine distance et donne, par suite, une augmentation de résistance intérieure. Pour remédier à cet inconvénient, Grave [*Proceedings of electrical Society* (1841)] remplace la lame d'argent par une gaze de fils d'argent platiné. Par ce moyen, l'hydrogène peut s'échapper à travers les mailles du tissu, au lieu de séjourner entre les lames, que l'on peut, par suite, rapprocher davantage.

Philipps de Saint-Austell propose l'emploi du tulle électrique, fabriqué ainsi qu'il suit : on prend un morceau de tulle que l'on tend sur un châssis, et on l'enduit de cire fondue; lorsqu'il est bien chaud, on le presse entre deux feuilles de papier buvard pour enlever l'excès de cire; puis on le plombagine, on le recouvre de cuivre galvanique, on l'argente et enfin on le platine.

Paterson remplace l'argent platiné par le fer platiné, obtenu en plongeant une lame de fer dans une dissolution acide de platine dans l'eau régale.

Pour remplacer la gaze de fils d'argent, qu'il peut être difficile de se procurer, C.-V. Walker indique la toile métallique de cuivre, que l'on commence par recouvrir d'un léger dépôt galvanique de cuivre; puis on l'argente et on la platine comme il

Digitized by Google

a été indiqué plus haut. Le couple se compose alors de deux lames très légèrement inclinées, une de zinc en dessous et une de toile métallique platinée en dessus, de sorte que le gaz, s'élevant perpendiculairement, s'échappe à travers les mailles du tissu et se dégage facilement dans l'atmosphère.

Mais la meilleure pile qui dérive de celle de Smée est sans contredit la pile de Walker, à électrodes de zinc et charbon platiné [*Philosophical Magazine*, 4e série, t. XVIII (1859)]. Pour préparer la lame de charbon platiné, on munit la lame d'une garniture de cuivre, qui sert à la rattacher au zinc suivant, et que l'on a soin d'étamer pour éviter la formation de sulfate de cuivre. Pour préparer de bonnes lames de charbon, l'auteur adopte la marche suivante.

On commence, pour les purifier, par les laisser tremper pendant plusieurs jours dans de l'acide sulfurique étendu de trois à quatre fois son volume d'eau ; puis on fixe la garniture de cuivre étamé avec des rivets également en cuivre étamé.

Enfin, on platine la lame en la faisant plonger dans de l'acide sulfurique étendu de dix fois son volume d'eau et dans lequel on ajoute des cristaux de chlorure de platine jusqu'à ce qu'il prenne une belle teinte jaune paille ; puis on fait communiquer le charbon avec le pôle négatif d'une pile dont l'électrode positive, en platine ou en charbon, plonge également dans le liquide. Au bout de vingt minutes le platinage est terminé, et il ne reste plus qu'à essayer chaque lame en s'en servant comme électrode pour décomposer l'eau. La plaque est bonne si elle laisse l'hydrogène se dégager sans aucune adhérence.

Quant au zinc, on prend du zinc amalgamé ou simplement des lames de zinc ordinaire dont la partie inférieure plonge dans un petit godet en gutta-percha contenant du mercure. De la sorte, l'amalgamation se produit d'elle-même et sans aucune perte de mercure.

On peut encore charger la pile avec de l'eau salée ; mais, dans ce cas, elle perd un peu de force.

Cette pile est préférable au couple de Smée ; car, dans ce dernier, la lame d'argent est usée au bout d'un an, tandis que

Digitized by Google

la lame de charbon de cornue platinée est inusable. La substitution du charbon platiné de Walker à l'argent platiné de Smée ne diminue, du reste, que d'une très faible quantité la force électro-motrice de la pile.

La pile Walker a obtenu une médaille à l'Exposition universelle de Londres de 1851, et est très employée en Angleterre, notamment dans les lignes télégraphiques du South-Eastern Railway.

Entre le prix de revient de cet élément et celui de l'élément de Smée il y a des différences considérables. Les plaques d'argent fabriquées pour les piles du télégraphe transatlantique anglais sont revenues à 2520 livres sterling (63 000^{fr}). Les plaques de charbon platiné en nombre égal et de mêmes dimensions n'ont coûté que 206 livres sterling (5150^{fr}).

Au bout de neuf ans les lames de charbon étaient encore en très bon état, tandis que les plaques d'argent étaient attaquées et trouées.

Le prix d'entretien de la pile Walker est des plus minimes et provient, pour les trois quarts, de la dépense de mercure. Ces piles peuvent fonctionner un an, et même quinze mois, sans qu'on ait à y toucher. C'est incontestablement une des meilleures piles à un liquide que l'on connaisse, et qui peut, pour bien des applications, soutenir la concurrence avec les piles à deux liquides.

Une autre modification de la pile de Smée, imaginée par Tyer, est assez généralement employée pour les signaux électriques, dans les chemins de fer anglais. Au fond d'un vase de terre ou de verre, on met des morceaux de zinc et une quantité de mercure assez grande pour garnir complètement le fond et faire communiquer les uns avec les autres tous les morceaux de zinc. Au-dessus, on verse de l'eau acidulée au vingtième d'acide sulfurique, dans laquelle plonge verticalement une lame d'argent platiné. A la partie supérieure de cette lame s'attache un fil de cuivre recouvert de gutta-percha, dont l'autre extrémité, recourbée vers le bas, se termine par une boule de zinc. Le montage des éléments en série s'effectue

Digitized by Google

simplement en plongeant la boule de zinc qui termine le fil de cuivre d'un couple dans le mercure qui garnit le bocal du couple suivant.

Cette pile offre l'avantage de permettre l'emploi de tous les débris de zinc, sans aucune perte; de plus, l'amalgamation étant parfaite, il n'y a aucune usure quand le circuit est ouvert. La pile peut alors rester montée plusieurs années et n'exige ni nettoyage ni entretien, à la condition de ne pas travailler trop fréquemment et d'être renfermée dans une boîte parfaitement close, ce qui rend négligeable l'évaporation. Toutefois, la pile Tyer n'est pas très économique, parce qu'elle demande une grande quantité de mercure, dont il est difficile de ne pas perdre une partie quand on démonte les éléments pour renouveler le liquide.

Le baron d'Ebner a exposé à Paris, en 1867 (section autrichienne), une pile analogue à la précédente, mais où la lame d'argent platiné est remplacée par une lame de plomb platiné; les autres dispositions restent les mêmes. La substitution du plomb à l'argent réduit le prix de revient de la pile, mais paraît abaisser un peu la force électro-motrice.

Dans les piles qui précèdent, on a tenté de diminuer la polarisation en recouvrant l'électrode positive d'un dépôt spongieux, de platine par exemple. Dans un ordre d'idées tout différent, Maistre [*les Mondes*, t. IV (1864)] a essayé de diminuer le dépôt d'hydrogène sur l'électrode positive en rendant cette électrode mobile, afin d'en retirer l'hydrogène à mesure qu'il s'y dépose.

D'abord, il remplace le zinc par du fer et acidule l'eau par l'acide azotique; le peroxyde de fer qui se produit n'est plus adhérent comme l'oxyde de zinc et se précipite au fond du vase.

Pour rendre mobile l'électrode positive, on emploie la disposition suivante.

Dans une caisse de bois on dispose très près l'un de l'autre dix bocaux plats de verre ou de terre, remplis d'eau acidulée au centième d'acide azotique et contenant une feuille de fer en-

Digitized by Google

roulée en cylindre creux. Sur deux bords opposés de la caisse sont des coussinets sur lesquels repose un axe de fer recouvert de gutta-percha; cet axe supporte des disques verticaux de cuivre, ou mieux de charbon, au nombre de dix, isolés les uns des autres par des rondelles de porcelaine et plongeant chacun par le tiers environ de sa surface dans le liquide d'un des bocaux. Dix lames de cuivre formant ressort sont fixées à des bornes métalliques sur le bord de la caisse et s'appuient sur la tranche des disques, pour recueillir l'électricité.

Pour avoir la pile disposée en quantité, on établit la communication entre tous les fers d'une part et tous les disques de l'autre; pour avoir de la tension, on réunit, au moyen de chaque borne, le fer d'un bocal avec le charbon du suivant.

Pendant que la pile fonctionne, on fait tourner l'axe, soit à la main, soit au moyen d'un mouvement d'horlogerie qui peut en faire marcher un grand nombre à la fois. Toutes les parties des disques de charbon, passant alternativement dans le liquide et dans l'air, perdent dans l'air l'hydrogène qui avait pu s'accumuler sur elles dans l'eau acidulée, ce qui empêche la polarisation d'une manière presque absolue. Aussi cette pile est-elle bien constante et donne, d'après l'auteur, une intensité plus grande que l'élément Daniell.

§ VI. — Piles a un seul métal.

Watkins [*Annales de Chimie et de Physique*, t. XXXVIII (1828)] est parvenu à construire avec un seul métal et sans liquide une pile voltaïque qui possède une tension remarquable. Elle se compose de soixante à quatre-vingts plaques de zinc, décapées et polies sur une de leurs surfaces et non sur l'autre, et fixées dans une auge de bois à une très petite distance les unes des autres ($0^m,001$ à $0^m,002$), de manière qu'elles ne soient séparées que par une couche d'air très mince. Les faces polies sont tournées toutes d'un même côté, et les plaques extrêmes aboutissent chacune à un conducteur.

Digitized by Google

Si l'on fait communiquer l'une des extrémités de la pile avec le sol et l'autre avec un électroscope, celui-ci se charge immédiatement de l'une ou l'autre électricité, suivant le pôle avec lequel il est en contact.

L'humidité de l'air favorise l'action de cette pile, qu'on peut regarder comme une espèce de pile sèche dans laquelle le papier est remplacé par une couche d'air; les deux surfaces du zinc, qui sont dans un état physique différent, font l'office de deux métaux hétérogènes.

Nous indiquons cette pile à titre de curiosité, car elle n'est, bien entendu, capable d'aucun travail. Sa résistance intérieure doit être énorme.

Gaugain [*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXIX (1869)] a trouvé que, lorsque deux électrodes de platine non platinées ont séjourné quelque temps dans une liqueur acide, l'une d'elles, étant retirée, lavée à l'eau distillée, puis remise dans le liquide, est nettement négative par rapport à l'autre.

La force électro-motrice de ce couple décroît rapidement, mais ne devient nulle qu'au bout d'une heure. Dans les premiers instants elle dépasse vingt-cinq fois celle de l'élément thermo-électrique bismuth-cuivre entre 0° et 100°. L'effet est beaucoup moindre avec des lames de platine platinées, mais toujours analogue.

Si l'on remplace l'eau acidulée par une dissolution de potasse, l'électrode lavée, puis replongée dans la liqueur, est positive par rapport à l'autre; il devient indifférent, dans ce cas, d'employer des électrodes platinées ou non.

En prenant deux électrodes non platinées et les plongeant dans un liquide quelconque, puis en lavant une, l'essuyant et l'immergeant de nouveau, on reconnaît, par le sens du courant, si la liqueur était neutre ou acide, alors même qu'elle est assez étendue pour ne plus exercer d'action sur les papiers réactifs. Cette méthode n'a d'autre inconvénient que d'exiger un galvanomètre à très long fil. Appliquée à différents sels, elle les a presque tous indiqués comme étant soit acides, soit basiques; extrêmement peu se sont montrés bien neutres.

Digitized by Google

En prenant une électrode de platine platinée et l'autre non platinée, on a, dans n'importe quel liquide, un courant dont l'intensité varie avec la nature du liquide, mais où l'élément positif est toujours l'électrode platinée. Dans l'eau acidulée sulfurique la force électro-motrice du couple au moment de l'immersion dépasse généralement le quart de l'élément Daniell; elle diminue graduellement; mais, si le circuit reste ouvert, la force électro-motrice conserve indéfiniment les deux cinquièmes de cette valeur.

§ VII. — Piles diverses.

Goodmann [*Philosophical Magazine* (1848); *Archives de Genève*, t. IX; *Fortschritte* (1847)] indique un moyen pratique d'employer dans la pile le potassium, dont l'usage avait déjà été proposé par Wheatstone. Il prend un tube de verre fermé à l'une de ses extrémités par une membrane, rempli d'huile de naphte et contenant un morceau de potassium. Le fond du tube plonge dans de l'eau acidulée recouvrant une lame de platine horizontale. Dans le tube à potassium on met encore une goutte de mercure qui a pour but de maintenir constamment amalgamée la portion du morceau de potassium exposée à l'action de l'eau acidulée. Pour fermer le circuit, on prend un fil de cuivre implanté dans le morceau de potassium.

Un seul élément décompose abondamment l'eau acidulée; mais jamais on n'a pu obtenir de décomposition avec un seul couple dans deux voltamètres successifs.

Cette pile paraît fournir de l'électricité à assez forte tension, car, tandis que pour produire une attraction entre les feuilles d'or d'un électroscope il fallait à Gassiot 3500 éléments à eau et à Grove 100 de ses éléments bien isolés, Goodmann l'a réalisée avec 12 de ses couples isolés, et plus tard avec 5, 4, 3 et 2. Un seul couple produisait même une légère déviation de la feuille d'or de son électroscope.

M. Roberts [*Dingler Journal*, t. CXXV; *Fortschritte* (1852)]

Digitized by Google

propose une pile à un liquide assez intense. Elle est formée par des lames d'étain et de platine qui plongent dans de l'acide azotique étendu. 50 petits éléments de cette pile, dont les lames d'étain avaient $0^m,16$ de haut et $0^m,11$ de large et dont les lames de platine étaient doubles, ont dégagé 21^{cc} de gaz tonnant en une minute et produit entre deux baguettes de charbon une vive lumière.

Il se forme dans cette pile du protoxyde d'azote qui se dégage, un peu d'ammoniaque et du bioxyde d'étain hydraté qui se dépose au fond du vase et qu'on peut utiliser dans la fabrication du stannate de soude, mordant usité dans la teinture.

Hulot [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XL (1855); *Archives de Genève*, t. XXIX] a essayé une pile à électrodes de zinc et d'aluminium plongeant dans de l'eau acidulée à un vingtième d'acide sulfurique. Cette pile a donné, pendant les premières heures, un dégagement d'hydrogène considérable et un courant au moins comparable à celui de l'élément platine-zinc. Après six heures, le courant avait perdu un cinquième de sa force initiale; au bout de vingt-cinq heures, il n'en avait plus conservé qu'un quart seulement. Pour lui rendre sa force première, il faut alors immerger l'aluminium dans de l'acide azotique et le laver.

L'auteur a pu faciliter le dégagement d'hydrogène et augmenter par suite la constance du couple en attaquant superficiellement l'aluminium par l'acide chlorhydrique, qui le rend rugueux, surtout quand il a été laminé.

Bultinck [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXI (1865)] indique la substitution du magnésium au zinc dans la pile comme devant produire un grand accroissement de force électro-motrice. N'ayant pas eu à sa disposition assez de magnésium pour construire un élément ordinaire, il a fabriqué une chaîne galvanique analogue à celle de Pulvermacher. Cette chaîne se compose de 20 éléments, chacun de trois pièces : un cylindre de caoutchouc de $0^m,014$ de long sur $0^m,004$ de large, un fil de magnésium de $0^m,035$ de long, et un fil d'argent de même longueur et de même diamètre que le fil de ma-

Digitized by Google

gnésium. On dispose ces fils comme dans la chaîne de Pulvermacher. 20 de ces éléments ainsi réunis donnent dans l'eau ordinaire, sans addition de sel ni d'acide, les mêmes effets que la chaîne de Pulvermacher, pour laquelle de l'eau acidulée est nécessaire.

Digitized by Google

CHAPITRE DEUXIÈME.

PREMIÈRE CLASSE. — PILES A UN SEUL LIQUIDE.

SECONDE SECTION. — PILES SANS POLARISATION.

Les tentatives faites pour éviter le dépôt d'hydrogène sur la lame positive de l'élément à un seul liquide ne donnent qu'une diminution de la polarisation, sans l'annuler, tant qu'on laisse le gaz se dégager et se porter sur l'électrode positive : c'est ce qu'on peut conclure après avoir passé en revue les piles de la précédente Section. Mais un moyen beaucoup plus efficace consiste à empêcher le dégagement de cet hydrogène en le fixant chimiquement sur une substance qui soit en contact avec la lame positive. Nous allons voir quelques exemples de cette méthode, dans lesquels la substance dépolarisante est, soit solide et peu ou point soluble, soit au contraire parfaitement soluble. Le choix de cette substance est d'ailleurs assujetti à la condition qu'elle ne donne pas lieu à une force électromotrice inverse de celle qui produit le courant.

§ I. — Piles a substance dépolarisante solide.

Les substances solides insolubles que l'on a employées les premières pour diminuer la polarisation sont les sels de plomb et de mercure.

M. Becquerel père a indiqué le principe des piles à sels de plomb dès 1837 [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. IV]. En 1846 [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXII], il imagina une pile à sulfate de plomb ainsi constituée : une lame de zinc est renfermée dans un diaphragme de toile à voile contenant de l'eau

Digitized by Google

saturée de sel commun; ce diaphragme plonge dans un vase rempli d'eau salée à saturation, tenant en suspension du sulfate de plomb, dont elle ne dissout que 0,02. L'électrode positive était formée soit par une plaque de charbon, soit par une lame de cuivre, de plomb ou de fer-blanc. La capacité du vase extérieur allait jusqu'à 3000^{lit}. Six de ces couples réunis en pile donnaient d'assez fortes étincelles.

Ces piles ont été employées pour le traitement électro-chimique des minerais d'argent et de plomb, et en particulier à l'usine de Dieuze, où l'on a réduit ainsi de grandes quantités de sulfate de plomb provenant des chambres de plomb de la fabrique d'acide sulfurique.

M. Edm. Becquerel [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. L (1860)] propose une légère modification dans la pile à sulfate de plomb imaginée par son père.

Il profite de ce que le sulfate de plomb, délayé avec une dissolution saturée de sel marin, durcit comme le plâtre et peut être moulé sans perdre sa porosité. On coule alors autour d'une baguette de plomb une pâte composée de 100^{gr} de sulfate de plomb desséché et broyé, 20^{gr} à 30^{gr} de chlorure de sodium et 50^{cc} d'une dissolution saturée de chlorure de sodium. On dispose la baguette ainsi formée au centre d'un cylindre de zinc, et l'on plonge le tout dans de l'eau salée ou acidulée d'acide sulfurique. Pour empêcher le cylindre de sulfate de plomb de se déliter, on peut l'entourer d'une couche de plâtre.

L'eau salée donne une force électro-motrice un peu plus grande; mais, comme elle dissout une certaine quantité de sulfate de plomb, il finirait par se déposer du plomb sur le zinc, inconvénient qui n'existe pas avec l'acide sulfurique.

Le sulfate de plomb est réduit par l'hydrogène même jusqu'au centre de la masse, de sorte que la polarisation est évitée, et la pile ainsi obtenue est bien constante.

D'après les expériences de M. Becquerel, la force électromotrice de cette pile est faible; elle n'est que de 30 avec l'eau salée et 27 avec l'eau acidulée sulfurique, la force électro-motrice de l'élément Grove étant représentée par 100 et celle de

Digitized by Google

l'élément Daniell par 58 ou 59. Ces nombres correspondent, en unités britanniques, à une force électro-motrice de $0^{volt},54$ pour l'élément Becquerel à eau salée, et de $0^{volt},49$ avec l'eau acidulée.

La résistance de ces piles est en même temps très grande, de sorte qu'elles ne semblent avantageuses que dans des circuits extrêmement résistants et pour des courants de longue durée.

En employant les mêmes substances, Marié-Davy [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLIX (1859)] a imaginé une pile d'une construction très simple et dont la disposition rappelle celle de la pile à colonne. Elle est formée de plats en fer battu étamé (plats ordinaires de Japy), dont le fond est doublé intérieurement d'une rondelle de zinc de mêmes dimensions. Chacun d'eux est garni d'une couche de sulfate de plomb de quelques centimètres d'épaisseur et rempli d'eau pure, salée ou contenant un sel de zinc. On les empile en colonne verticale, 40 éléments formant au plus 1^{m} de haut.

Au lieu du sulfate de plomb on peut employer le chlorure; mais il est bon de le fondre et de le casser ensuite en petits morceaux avant de l'introduire dans la pile.

Cette pile a une force électro-motrice à peine inférieure à celle de l'élément Daniell; elle est presque aussi constante et bien plus économique.

La pile à sulfate de plomb convient parfaitement pour les télégraphes, mais moins bien pour les appareils où il faut des courants intenses, comme pour la bobine de Ruhmkorff, car le sulfate de plomb, très peu soluble, n'absorbe pas assez rapidement l'hydrogène, et alors la pile se fatigue. Il n'en est plus de même avec la pile à chlorure, ce dernier sel étant beaucoup plus conducteur et plus soluble que le sulfate.

Cette pile est très économique, car le sulfate de plomb, résidu de la préparation de l'acétate d'alumine, est d'un prix assez bas, comme ayant peu d'usages. La quantité d'hydrogène dégagée par l'usure dans la pile de 33^{kg} de zinc à 25^{fr} réduirait 144^{kg} de sulfate de plomb et donnerait 104^{kg} de plomb, valant 65^{fr}. Cette différence de 40^{fr} entre les prix du zinc et du plomb

Digitized by Google

servirait à couvrir en partie les frais d'acquisition du sel de plomb et les pertes inévitables.

En badigeonnant au pinceau et d'un côté seulement une feuille de papier épais et non collé avec du sulfate de plomb délayé dans de l'eau gommée, et en découpant ce papier en rondelles, on peut monter une pile à colonne fer-blanc, zinc et papier au sel de plomb. Trois de ces éléments ont fait marcher pendant six heures une sonnerie électrique à fil court. Cette pile serait avantageuse pour les usages médicaux.

M. Marié-Davy indique, à propos de la pile à sels de plomb, que l'on pourrait encore employer comme corps dépolarisant le chlorure d'argent qui est complètement réduit par l'hydrogène sans perdre sa forme. C'est donc lui qui semble avoir eu le premier l'idée des piles à chlorure d'argent, employées depuis par MM. de la Rue et H. Müller et Pincus.

M. de la Rive [*Archives de l'Électricité*, t. III (1843) ; *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XVI (1843)] propose d'employer le peroxyde de plomb dans la pile comme corps dépolarisant. On met dans un vase poreux une lame mince de platine autour de laquelle on tasse fortement le peroxyde de plomb (oxyde puce). Le vase extérieur contient, comme d'habitude, un cylindre de zinc amalgamé et de l'eau acidulée au dixième ou au vingtième.

M. de la Rive a aussi proposé l'emploi du bioxyde de manganèse ; mais cette substance donne, avec l'eau acidulée, un courant qui s'affaiblit beaucoup plus vite que celui du bioxyde de plomb.

Dans cette pile, la polarisation n'est pas complètement détruite ; par suite la force électro-motrice diminue un peu au bout de quelque temps.

M. de la Rive indique quelques particularités curieuses que présente sa pile :

Un seul couple à bioxyde de plomb décompose l'eau plus énergiquement qu'un couple de Grove de mêmes dimensions. Cet avantage ne se maintient pas si l'on emploie plusieurs éléments à bioxyde de plomb ; 2 éléments donnent déjà un effet

Digitized by Google

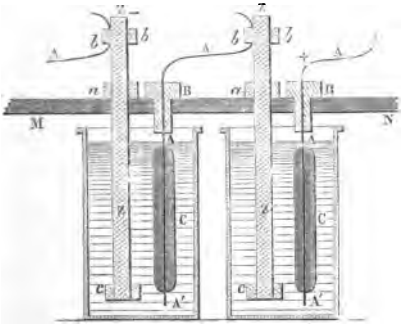
moins puissant que 2 éléments de Grove. Mais, si l'on accouple 1 élément de Grove et 1 à bioxyde de plomb, on obtient des effets plus énergiques qu'avec 2 couples à sel de plomb, et même qu'avec 2 éléments de Grove.

Ces effets et quelques autres analogues qu'on trouvera dans le Mémoire de M. de la Rive s'expliquent par la grande résistance de l'élément à peroxyde de plomb.

MM. Warren de la Rue et H. Müller [*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXVII (1868); *les Mondes*, t. XVI et XVIII] ont imaginé une très bonne pile à un liquide, où la dépolarisation est effectuée par le chlorure d'argent, dont l'emploi avait déjà été indiqué par M. Marié-Davy [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLIX].

La pile se compose simplement d'un petit bâton de zinc non amalgamé et d'un fil d'argent recouvert de chlorure d'argent, qui sont plongés tous les deux dans de l'eau salée contenant 25gr de chlorure de sodium par litre d'eau distillée. Il se forme du chlorure de zinc, tandis que le chlorure d'argent est réduit en donnant de l'argent spongieux qui, par sa nature même, se laisse facilement pénétrer par le liquide, de sorte que la réduction du chlorure d'argent peut être complète et pénétrer jusqu'au centre du cylindre.

Fig. 44.



Dans la première forme de cette pile (*fig.* 44), les verres contenant l'eau salée reposent tous sur une même planche

Digitized by Google

munie de deux montants de verre que viennent serrer deux anneaux de caoutchouc fixés à une traverse horizontale de bois. Cette traverse porte les éléments, de sorte qu'on peut les retirer tous à la fois du liquide aussitôt que l'on a fini de se servir de la pile. Les anneaux de caoutchouc serrent suffisamment les colonnes de verre pour maintenir les éléments dans la position qu'on désire leur donner.

Le zinc est une baguette Z, de $0^m,10$ de longueur sur $0^m,0045$ de diamètre; elle dépasse de $0^m,015$ le montant de bois MN qui la porte, et qu'elle traverse, et est retenue en place par un anneau de caoutchouc *a*. Un second anneau *b*, placé au-dessus de ce dernier, a pour objet de serrer le fil d'argent contre le zinc, et remplace une vis de pression. Pour empêcher tout contact dans le liquide entre le zinc et le chlorure d'argent, la baguette de zinc porte à sa partie inférieure un troisième anneau de caoutchouc *c*.

L'élément électro-négatif est un fil d'argent A, ayant une longueur de $0^m,15$ et un diamètre de $0^m,0007$. Dans la partie inférieure du fil est coulé un cylindre de chlorure d'argent C, ayant $0^m,064$ de longueur et $0^m,0065$ de diamètre. Le fil d'argent dépasse d'environ $0^m,002$ l'extrémité inférieure A′ du cylindre de chlorure. Ce prolongement est absolument nécessaire pour établir le courant quand on fait fonctionner l'appareil pour la première fois, car le chlorure d'argent est très mauvais conducteur, et même presque isolant.

La portion du fil recouverte de chlorure d'argent plonge en entier dans le liquide; au-dessus, le fil d'argent passe dans un manchon B de caoutchouc durci, terminé par un anneau qui s'appuie sur la traverse de bois, comme l'anneau *a* du cylindre de zinc, et maintient le second cylindre en place. L'extrémité supérieure du fil d'argent se recourbe deux fois à angle droit pour passer dans l'anneau de caoutchouc et arriver en contact avec le zinc du couple suivant.

Quand on fait fonctionner la pile pour la première fois, il est nécessaire de fermer le circuit en joignant directement les pôles; on observe promptement la réduction d'un peu de chlo

Digitized by Google

rure, condition nécessaire pour que le courant de la pile prenne son intensité normale; cette intensité va du reste en augmentant légèrement dans les premiers jours où l'on emploie la pile.

Une pile de 10 éléments ainsi constitués n'avait que $0^m,40$ de long, $0^m,065$ de large et $0^m,23$ de haut. Dans un voltamètre à eau acidulée au huitième, elle dégageait 2^{cc} de gaz tonnant par minute ou 120^{cc} par heure quand tous les éléments étaient complètement immergés. On peut réduire à volonté ce dégagement et l'amener à moins du huitième de cette valeur en ne plongeant dans l'eau salée qu'une faible partie des cylindres. On règle ainsi l'usure du chlorure et, en ayant soin d'abaisser de temps en temps la barre de support, on parvient à maintenir continue pendant plusieurs jours la marche de l'appareil.

Le cylindre de chlorure d'argent pèse $11^{gr},5$ et correspond à peu près au dégagement de 1424^{cc} de gaz tonnant sous la pression 760^{mm} et à 15°; par conséquent, si l'on emploie la pile d'une manière continue et complètement immergée, elle devra durer presque douze heures (11^h50^m); pour des travaux intermittents, la durée sera nécessairement beaucoup plus grande. Il serait facile, du reste, de faire des cylindres de chlorure d'argent d'un diamètre plus grand, suivant les besoins des expériences.

Quand tout le chlorure d'argent est réduit, une action secondaire décompose un peu du chlorure de zinc formé; pour retirer l'argent pur, il faut donc dissoudre le zinc adhérent par l'acide chlorhydrique étendu d'eau. Mais, avant cela, il est bon de s'assurer de la décomposition totale du chlorure d'argent en mettant les cylindres épuisés en contact avec du zinc dans de l'eau acidulée.

L'argent poreux, provenant de la réduction du chlorure, reste adhérent au fil central sans se désagréger aucunement, quoique ses dimensions soient plus grandes et que sa forme soit moins régulière que celles du cylindre primitif de chlorure. Il n'y a donc aucune perte d'argent et, par conséquent, le renouvellement du cylindre est principalement une question de main-d'œuvre. Les frais sont du reste peu considérables, car, avec

Digitized by Google

une lingotière contenant plusieurs moules, on peut couler le chlorure rapidement. La lingotière doit avoir une forme qui lui permette de maintenir le fil d'argent au-dessus et dans l'axe de chaque espace cylindrique; de plus un trou est pratiqué au fond de chaque moule pour laisser le passage au petit bout de fil qui doit dépasser le cylindre de chlorure, comme nous l'avons indiqué plus haut.

Il est évident que l'on peut varier la forme et les dimensions de la pile presque à volonté. On pourrait même employer des lames de chlorure d'argent, car ce corps possède une grande solidité. Quoique assez mou pour pouvoir être coupé au canif et pour pouvoir être laminé, il est assez élastique pour produire des vibrations sonores quand on le frappe; il conserve donc parfaitement la forme qu'on lui donne.

La force électro-motrice de cet élément a été déterminée par Matthiessen et Hockin, qui l'ont trouvée égale, à très peu de chose près, à celle de la pile Daniell.

La résistance interne de 10 éléments, estimée par le courant qu'ils ont produit successivement en présence de résistances de 31 200 unités de l'Association britannique (ohms) et de 10 unités seulement, a été de 56 ohms, ce qui donne $5^{\text{ohms}},6$ pour chaque élément. C'est, avec l'unité de Siemens, une résistance 6 environ. Pendant ces expériences de mesure, on a observé des oscillations assez lentes, indiquant de légères augmentations et diminutions périodiques de force électro-motrice. Il serait intéressant de reprendre ce point et de voir si ces pulsations n'existeraient pas à période plus courte dans tous les courants des piles voltaïques.

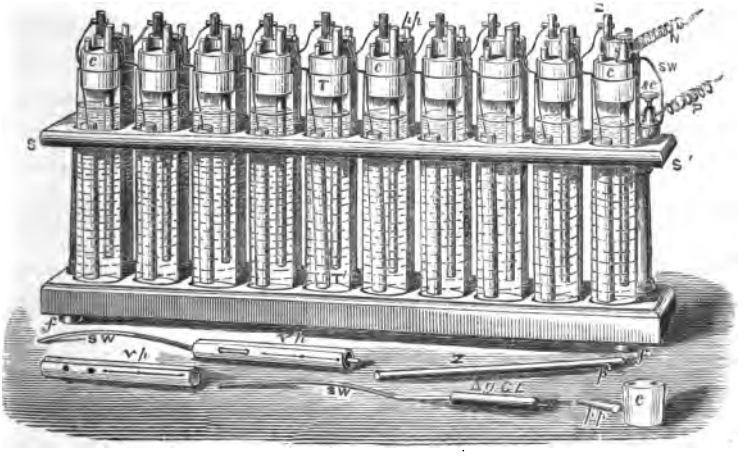
Les auteurs, avec une pile de 200 éléments, ont maintenu facilement un arc lumineux entre deux pointes de charbon de bois de buis écartées de $0^{\text{m}},004$ à $0^{\text{m}},005$. 18 éléments suffisent pour faire détoner une fusée d'artillerie d'Abel, et 100 éléments pour faire partir quatre de ces fusées réunies en chaîne.

Dans la disposition la plus récente de cette pile [*Annales de Chimie et de Physique*, t. XIII (1878)], les baguettes de zinc et de chlorure ne sont plus mobiles : le vase de verre,

Digitized by Google

contenant une solution de sel ammoniac à 25 pour 1000 d'eau distillée, est fermé par un gros bouchon de paraffine (*fig.* 45). Ce bouchon est traversé par la baguette de zinc et le ruban d'argent entouré de chlorure. L'emploi de la paraffine présente ce double avantage que c'est une substance très isolante et nullement hygrométrique; l'isolement des deux électrodes est donc aussi parfait que possible et par tous les temps. Comme

Fig. 45.



il pourrait se dégager des gaz dans la pile, il est bon de pratiquer dans la paraffine un trou qu'on bouche par un petit cylindre de paraffine simplement appliqué sur l'orifice. Cette fermeture est suffisante pour empêcher l'évaporation, mais ne permet pas à un excès de pression de s'établir à l'intérieur.

La force électro-motrice de cet élément, d'après les dernières expériences de M. Warren de la Rue, est de $1^{volt},03$; la résistance peut s'abaisser à 5 ohms, mais elle augmente lentement, par suite d'un dépôt d'oxychlorure de zinc sur la tige de zinc. Un moyen expéditif de remettre en état les éléments dont la résistance est ainsi devenue trop grande consiste à y verser 1^{cc} d'une dissolution d'acide chlorhydrique de densité égale à 1,16.

A cause de l'emploi de l'argent, il convient de ne pas amal-

Digitized by Google

gamer le zinc, mais on doit alors le prendre aussi pur que possible; M. W. de la Rue recommande particulièrement le zinc de la Vieille-Montagne.

Le ruban d'argent recouvert de chlorure est entouré d'un petit cylindre de papier parchemin, ouvert aux deux bouts, et qui empêche tout contact entre le zinc et le chlorure.

Enfin, avant de couler tout autour le chlorure, on passe le ruban d'argent dans deux trous du cylindre de papier. Il reste donc ainsi à l'extérieur de ce cylindre une petite longueur d'argent non recouverte de chlorure, condition utile, comme nous l'avons vu, pour le premier établissement du courant.

La pile Warren de la Rue, imaginée primitivement pour étudier la stratification de la lumière électrique dans les gaz très raréfiés, avec le courant direct et sans le secours de l'induction, peut être utilisée dans bien des cas. Elle est très commode pour sa simplicité; l'usure y est nulle quand les éléments sont immergés dans l'eau salée et que le circuit est ouvert; son prix de revient n'est pas très élevé, enfin elle n'occupe qu'un très petit volume et est à peu près constante. Cette constance même la rend avantageuse pour la dorure électro-métallique. Elle serait également très propre à la télégraphie; toutefois, si l'on conservait les dimensions ordinaires, le chlorure d'argent serait vite épuisé, et la pile nécessiterait des démontages trop fréquents.

M. Pincus [*Poggendorff's Annalen*, t. CXXXV (oct. 1868); *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVII; *les Mondes*, t. XIX; *Carl Repertorium*, t. IV, V] propose une pile à chlorure d'argent analogue à celle de MM. Warren de la Rue et H. Müller, à qui il dispute même la priorité de l'invention. Cependant la pile de M. W. de la Rue remonte au moins au mois de mars 1868 (voir *les Mondes*, t. XVI), tandis que la pile Pincus ne date que du mois de juin de la même année. Nous avons vu, du reste, que l'emploi du chlorure d'argent avait été indiqué par M. Marié-Davy dès 1859.

Au fond d'un tube de verre de $0^m,15$ à $0^m,20$ de long et de $0^m,02$ de diamètre, on dispose un petit vase ayant la forme

Digitized by Google

d'un dé à coudre, fait avec une feuille mince d'argent de 6^{cq} de surface et contenant du chlorure d'argent en poudre.

Au godet d'argent est soudé un fil de cuivre isolé soit dans un tube de verre, soit par de la gutta-percha, et qui sort du tube en traversant le bouchon qui le ferme. Dans ce même bouchon passe un second fil de cuivre également isolé et qui porte une lame de zinc de 6^{cq} de surface environ. Cette lame plonge dans le liquide (eau acidulée ou salée) qui remplit le tube aux quatre cinquièmes.

Un élément ainsi construit dévie fortement l'aiguille d'un galvanomètre très ordinaire; 3 ou 4 décomposent l'eau. 4 éléments ont suffi pour la manœuvre d'un télégraphe Morse sans relais, d'Insterburg à Kœnigsberg, à une distance d'environ 88^{km}. Enfin 2 éléments ont fait fonctionner sans interruption pendant plusieurs semaines une sonnerie électrique ordinaire.

La force électro-motrice de cet élément est intermédiaire entre celles des couples Bunsen et Daniell, d'après M. Pincus, mais plus rapprochée de la dernière; Matthiessen et Paalzow ont, de leur côté, trouvé cette force électro-motrice égale à celle de l'élément Daniell. La résistance est très grande, mais variable à volonté suivant la distance du zinc et de l'argent. Cette grande résistance convient pour les usages médicaux, et c'est effectivement pour cela que l'auteur avait primitivement imaginé cet élément.

La pile Pincus a été construite en particulier par M. Mœvig, à Kœnigsberg [*Carl Repertorium*, t. V]. Il rassemble un certain nombre d'éléments en attachant tous les zincs à une même traverse de bois qui permet de les manœuvrer tous à la fois. 30 de ces éléments ainsi disposés n'occupent qu'un espace de $0^{m},48$ de long, $0^{m},09$ de large et $0^{m},20$ de hauteur maximum quand les zincs sont soulevés hors du liquide.

M. Gaiffe fait un grand usage, pour les appareils médicaux, de la pile au chlorure d'argent. Les éléments ont en général de très petites dimensions, et, pour éviter de répandre le liquide, ils sont hermétiquement clos. Il existe même un modèle dans lequel il n'y a pas de liquide libre : le zinc et le fil d'argent re-

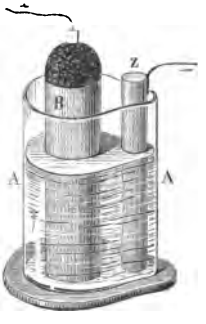
Digitized by Google

couvert de chlorure sont simplement séparés par plusieurs feuilles de papier à filtre trempées dans une solution de chlorure de zinc.

Le bioxyde de manganèse est un corps qui est très employé maintenant dans les piles comme corps dépolarisant. Le premier qui paraît en avoir indiqué l'usage, comme nous l'avons dit plus haut (p. 136) est de la Rive (DE LA RIVE, *Traité d'électricité*, t. II, p. 260); mais les essais ne furent pas alors satisfaisants et l'emploi du bioxyde de manganèse fut abandonné complètement jusqu'à Leclanché.

La pile de Leclanché [*les Mondes*, t. XVI (1868); *Poggendorff's Annalen*, t. IV] se compose d'un premier vase A en terre ou en verre (*fig.* 46), contenant une baguette de zinc amalgamé Z, puis d'un vase poreux B avec une lame de charbon des cornues, comme la pile de Bunsen ordinaire. La différence con-

Fig. 46.



siste en ce qu'autour du zinc on verse une dissolution de sel ammoniac, et que le vase poreux est rempli complètement d'un mélange en parties égales de bioxyde de manganèse et de charbon des cornues ou de coke; c'est le bioxyde de manganèse qui est réduit par l'hydrogène et qui joue le rôle de corps dépolarisant.

Le cylindre creux de zinc est remplacé par un simple bâton de zinc amalgamé, parce que l'on a démontré que les dimensions du zinc n'ont que fort peu d'influence sur la résistance de la pile. Le vase extérieur présente alors sur le côté une petite

Digitized by Google

ation pour loger le zinc, comme on le voit dans la *fig.* 46, représente le premier modèle de cette pile.

eclanché exprime les réactions qui se produisent dans sa par l'équation suivante :

$$AzH^4Cl + 2MnO^2 + Zn = Mn^2O^3 + AzH^3 + HO + ZnCl.$$

l se formerait donc ainsi de l'ammoniaque libre, du chlorure zinc et du sesquioxyde de manganèse. En réalité, les réacns sont beaucoup plus compliquées : le chlorhydrate d'amoniaque et le chlorure de zinc réagissent l'un sur l'autre et forment un chlorure double d'ammonium et de zinc; il se produit également de l'oxychlorure de zinc. Ces sels, étant peu solubles, cristalliseraient bientôt sur le zinc et augmenteraient énormément la résistance de la pile; on ne peut les maintenir dissous qu'en employant une dissolution saturée de sel ammoniac.

Les chlorures de sodium et de potassium ont été essayés par M. Leclanché à la place du sel ammoniac, mais donnent des résultats beaucoup moins satisfaisants.

La variété de bioxyde de manganèse la plus avantageuse est celle qui est connue dans le commerce sous le nom de *manganèse aiguillé;* il est cristallisé, soyeux et a l'éclat graphitoïde; autant que possible il doit être un peu dur. Avant de s'en servir, il faut le passer au crible pour en retirer la poussière, et ne conserver que des grains assez gros. Le charbon de cornue doit aussi être en grains un peu gros, car la poussière augmenterait beaucoup la résistance et la polarisation. En comparant les piles montées avec de la poussière ou des grains un peu gros, on a, en effet, les nombres suivants, qui sont rapportés à la force électro-motrice d'un élément Daniell :

	Poudre fine.	Poudre grossière.
Force de polarisation après 15 minutes...	0,300	0,082
» » 30 » ...	0,450	0,090
» » 45 » ...	0,500	0,110
» » 1 heure	0,510	0,118

La dissolution de sel ammoniac doit être concentrée, et il ne

Digitized by Google

faut la verser que jusqu'à la moitié environ de la hauteur du vase poreux, car plus le bioxyde de manganèse est sec, mieux fonctionne la pile.

Enfin il est préférable de se servir de zinc amalgamé, car les cristaux qui finissent toujours par se produire tombent au fond du vase si le zinc est amalgamé, au lieu de former à la surface du zinc des cristallisations qui entraveraient l'attaque ultérieure.

Le grand avantage de cette pile, outre qu'elle n'emploie que des substances à bon marché, est que l'usure y est presque complètement nulle quand la pile ne fonctionne pas : l'usure se réduit, en effet, à l'action de l'air sur le zinc, c'est-à-dire à quelques centigrammes de zinc par an; de plus, elle ne s'altère pas par le repos. Aussi cette pile peut-elle durer d'un à trois ans, et même davantage sur les lignes télégraphiques, où il y a de fréquentes interruptions.

La petitesse de la résistance de la pile Leclanché est un avantage pour la télégraphie, car les pertes par dérivation se font alors moins sentir. Sur une ligne télégraphique, 28 éléments Leclanché peuvent en remplacer 40 de Daniell. Ces éléments sont aussi plus avantageux que l'élément Marié-Davy à sels de mercure, dont nous parlerons plus loin. En effet, le bioxyde de manganèse contient environ 5 à 6 pour 100 d'oxygène utile, comme le sulfate de mercure, mais ne coûte que $0^{fr},70$ à $0^{fr},80$ le kilogramme, au lieu de 3^{fr} ou $3^{fr},50$. De plus, le rendement du bioxyde est presque le rendement théorique, à cause de l'insolubilité du bioxyde de manganèse dans les sels ammoniacaux, tandis que le rendement du sulfate de mercure ne dépasse pas 50 pour 100.

D'après Leclanché, la force électro-motrice de son élément serait 1,382 de celle du daniell; mais, en réalité, elle est un peu moindre, comme l'a montré J. Müller : 1,382 est bien la force électro-motrice de l'élément nouvellement monté, mais la dépolarisation n'est pas complète dans l'élément Leclanché, ce qui fait qu'au bout de quelque temps sa force électro-motrice s'abaisse et finit par ne devenir que les 0,896 de celle de l'élément Daniell; mais, à partir de ce moment, elle reste bien

Digitized by Google

constante. Du reste, la pile reprend intégralement sa force électro-motrice primitive après quelques instants de repos.

Si dans la pile Leclanché on remplace tout le bioxyde de manganèse par du charbon de cornue ou du coke, la dépolarisation est nécessairement moins efficace encore, et la force électro-motrice tombe à la moitié de celle de l'élément Daniell.

On construit trois modèles de cette pile avec vase poreux.

Dans le petit modèle, le vase poreux a $0^{m},06$ de diamètre et $0^{m},11$ de haut; son travail électrique annuel correspond à la réduction de 40^{gr} de cuivre au voltamètre. Sa résistance est de 9 à 10 ohms, et il suffit parfaitement aux postes télégraphiques ordinaires fonctionnant sans relais.

Dans le moyen modèle, le vase poreux a $0^{m},15$ de hauteur et $0^{m},06$ de diamètre. Son travail électrique annuel correspond au dépôt de 60^{gr} à 70^{gr} de cuivre au voltamètre. Sa résistance est de 5 à 6 ohms, et il suffit pour les postes télégraphiques les plus chargés, même fonctionnant avec relais.

Enfin, le grand modèle (disque) a un vase poreux de $0^{m},15$ de hauteur sur $0^{m},08$ de diamètre. Son travail électrique annuel correspond à un dépôt de 100^{gr} à 125^{gr} de cuivre au voltamètre. Sa résistance est de 4 ohms environ. Il est très suffisant pour les sonneries des disques de chemins de fer, dont le circuit est fermé vingt heures sur vingt-quatre; cet emploi fait qu'on désigne parfois ce modèle sous le nom d'*élément-disque*. Seulement, avec cet élément, il faut que la sonnerie ait au moins 50^{km} de résistance.

Comme il n'y a pas, dans l'élément Leclanché, deux liquides à séparer l'un de l'autre, le vase poreux n'offre pas grande utilité et augmente sans profit la résistance; aussi emploie-t-on maintenant une disposition où ce vase est supprimé [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXIII (1876)]. La baguette de charbon qui forme le pôle positif est entourée d'un mélange aggloméré qui contient le bioxyde de manganèse.

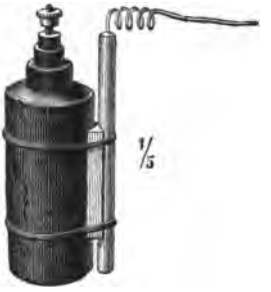
On prend pour cela environ 40 parties de bioxyde de manganèse, 52 de charbon, 5 de gomme laque et 3 de bisulfate de potasse, et l'on comprime le tout autour de la baguette de charbon

Digitized by Google

au moyen d'une presse hydraulique, à la pression de 300^{atm} et à la température de 100°. On obtient ainsi une masse qui conduit d'autant mieux qu'elle est plus compacte.

Dans les modèles fabriqués en premier lieu, ce mélange était comprimé directement autour du charbon, sous forme de cylindre (*fig.* 47); entre ce cylindre et le bâton de zinc on met

Fig. 47.



une baguette de bois, et l'on réunit le tout au moyen d'anneaux de caoutchouc. De la sorte le zinc et le charbon peuvent être manœuvrés ensemble et plongés à la fois dans le liquide, sans jamais venir en contact.

Il y avait encore un inconvénient : c'est que, lorsque le bioxyde était épuisé, le charbon se trouvait perdu. Dans le modèle actuel [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. LXXXVII (1878)], le pôle positif est formé d'une lame rectangulaire de charbon (*fig.* 48), sur les deux faces de laquelle on pose deux plaques agglomérées, préparées comme il a été dit plus haut; le crayon de zinc est séparé de ces plaques par un bloc de bois, et le tout est serré par deux bagues de caoutchouc. Le grand avantage de cette disposition est qu'on peut remplacer à volonté les plaques agglomérées sans perdre le charbon, puisqu'elles ne lui sont pas fixées autrement que par les anneaux de caoutchouc. Il en résulte une notable économie dans l'entretien de cette pile. Suivant les dimensions de la pile, on peut employer une, deux ou trois de ces plaques agglomérées.

La résistance des éléments Leclanché à plaques agglomé-

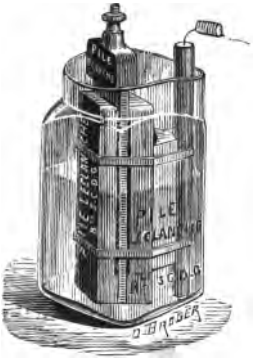
Digitized by Google

rées est beaucoup plus faible que celle des éléments à vase poreux. Elle est à peu près de :

ohm 1,8	pour l'élément	n° 2	avec	1	plaque agglomérée,
1,4	»	n° 1	»	2	plaques agglomérées,
0,9	»	(disque)	»	3	»

Quand la pile est ouverte à l'air, le liquide s'évapore et il se forme bientôt des dépôts cristallins. Ces dépôts grimpent en

Fig. 48.



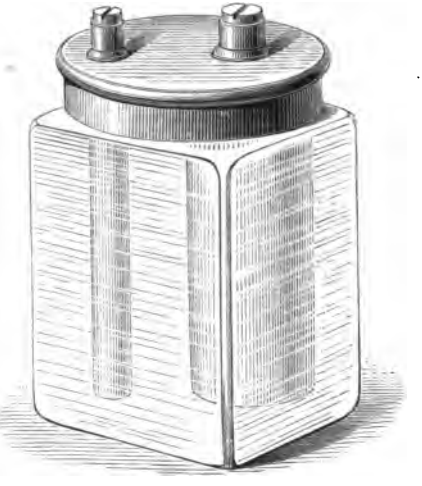
général le long des parois, et forment une croûte qui peut descendre à l'extérieur. Le meilleur moyen pour empêcher ces sels grimpants, aussi bien dans l'élément Leclanché que dans les autres piles, consiste à recouvrir d'une couche mince de paraffine les parois internes du vase, dans toute la portion supérieure, celle qui dépasse le niveau du liquide.

Le principal avantage de la pile Leclanché est qu'elle ne consomme rien à circuit ouvert et que le repos, bien loin de l'altérer, lui rend sa force primitive. Aussi cette pile convient-elle pour presque tous les usages, et c'est certainement la plus répandue aujourd'hui. Elle est adoptée dans les lignes télégraphiques de presque toute l'Europe, par la Compagnie de l'Est, dans les appareils Tiers de la Compagnie de l'Ouest, sur les lignes du Nord et de Lyon, etc. C'est encore cette pile dont on se sert à Paris pour faire fonctionner presque toutes les sonneries électriques des maisons.

Digitized by Google

Parmi les piles diverses que le génie militaire emploie pour produire à distance l'explosion des torpilles ou des mines, il faut signaler un élément Leclanché ordinaire, fermé hermétiquement par un couvercle en caoutchouc durci (*fig.* 49); le

Fig. 49.



bâton de zinc et le vase poreux qui contient le charbon et le bioxyde de manganèse sont suspendus au couvercle, de sorte que la pile peut être retournée pendant le transport sans aucun inconvénient. On supprime toute crainte de casser les vases de verre en les entourant d'une enveloppe épaisse de feutre.

Dans les télégraphes anglais, on donne encore à la pile Leclanché la disposition suivante : au fond du vase on met une lame de charbon; dessus on tasse le mélange de charbon et de bioxyde de manganèse; on pose sur ce mélange la lame de zinc, puis du chlorhydrate d'ammoniaque, et l'on verse enfin dans le vase la dissolution de chlorhydrate. Il n'y a donc plus de vase poreux, et les deux électrodes sont disposées horizontalement l'une au-dessus de l'autre.

M. Gaiffe [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVII (1868)], étudiant le rôle du coke tassé autour du charbon dans les piles Leclanché, a conclu qu'il

Digitized by Google

agissait en augmentant considérablement la surface du pôle charbon et en portant une partie de cette surface à une très faible distance du vase poreux. Il était probable dès lors que le coke employé dans toutes les piles à grande résistance intérieure donnerait de bons résultats. En effet, en ajoutant du coke dans les vases poreux de deux piles à sulfate de plomb et à sulfate de protoxyde de mercure, leur résistance intérieure a été beaucoup diminuée et leur constance est devenue presque parfaite.

Le même constructeur [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXVI (1878)] a encore proposé la disposition suivante de l'élément Leclanché.

Dans un vase de verre on met un bâton de zinc et un cylindre de charbon aggloméré et poreux, percé dans toute la longueur de trous parallèles à l'axe, dans lesquels on met des grains de bioxyde de manganèse. On remplit enfin le vase avec de l'eau contenant 20 pour 100 de chlorure de zinc exempt de plomb et aussi neutre que possible. Il se forme, lorsque le circuit est fermé, de l'oxyde de zinc qui tombe à l'état pulvérulent au fond du bocal.

D'après M. Gaiffe, la force électro-motrice, la résistance et la constance de ce couple ne perdraient rien par la substitution du chlorure de zinc au chlorhydrate d'ammoniaque. Chacun peut recharger ce couple sans aucune difficulté; il ne donne plus lieu à la formation du chlorure double de zinc et d'ammonium qui incruste parfois les vases poreux dans l'élément Leclanché ordinaire; enfin l'avidité du chlorure de zinc pour l'eau en arrête assez l'évaporation pour qu'on n'ait jamais à craindre l'arrêt du courant par dessiccation.

Sinsteden [*Poggendorff's Annalen*, t. CXXXVII (1869); *Archives de Genève*, t. XXXIX] trouve que dans l'élément Leclanché les pôles zinc et charbon en présence sont trop éloignés et trop peu étendus, et que de plus la soudure de l'électrode au charbon s'altère rapidement. Il propose alors la modification suivante.

La paroi intérieure d'un vase de grès est garnie de prismes de

Digitized by Google

charbon de cornue serrés par des coins également en charbon de cornue; le tout forme une sorte de voussure. Un fil d'argent, solidement introduit dans chacun des prismes, se relie à un gros fil de cuivre fixé sur le bord extérieur du vase et servant d'électrode positive. Le vase poreux renferme la dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque et un cylindre de zinc amalgamé, et est introduit dans le vase, que l'on achève de remplir avec un mélange de bioxyde de manganèse et de charbon concassé, imbibé d'une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque. Le vase peut être fermé par un couvercle également en grès, ne laissant passer que les électrodes. On a de la sorte un appareil parfaitement propre. Sinsteden affirme qu'après un usage de quinze mois deux éléments ainsi construits étaient aussi propres et aussi actifs que le premier jour.

Tyer (Niaudet, *Pile électrique*) construit d'une façon économique des éléments Leclanché en séparant un vase de porcelaine en deux compartiments par une cloison verticale de porcelaine, percée de trous. Dans l'un des compartiments on met une lame de charbon autour de laquelle on tasse un mélange de coke et de bioxyde de manganèse; dans l'autre on suspend une lame de zinc et l'on y verse la dissolution de sel ammoniac. L'élément monté de cette façon semble se polariser plus vite que l'élément Leclanché ordinaire.

MM. Clarke et Muirhead (*Telegraphic Journal*, 1876, vol. IV, p. 244) ont imaginé de platiner les morceaux de charbon de l'élément Leclanché par le procédé que nous avons indiqué à propos de la pile Walker (p. 125). De plus, le zinc est au centre, dans un vase de porcelaine percé de trous; c'est, non plus une baguette, mais un cylindre creux de grand diamètre. Le mélange dépolarisant, charbon platiné et bioxyde de manganèse, est à l'extérieur, dans l'espace annulaire qui sépare les deux vases.

L'augmentation de surface du zinc n'a pas, comme nous l'avons dit, une grande importance. Quant au platinage des charbons, il diminue notablement la polarisation, mais le montage de la pile est beaucoup moins simple qu'avec la disposition Le-

Digitized by Google

clanché à plaques agglomérées, de sorte qu'il est douteux que la nouvelle modification se répande jamais beaucoup.

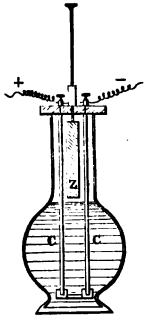
§ VI. — Piles a substance dépolarisante liquide.

Le type de ce genre de pile est celui où l'on emploie une dissolution de bichromate de potasse. Ce sel a été proposé par Poggendorff. C'est un oxydant énergique; par conséquent, il fournit à l'hydrogène mis en liberté par le courant l'oxygène nécessaire pour sa transformation en eau, et il n'y a pas de dégagement gazeux sur la lame positive.

Nous ne traiterons, dans ce qui suit, que des piles à un liquide, à bichromate de potasse; nous décrirons, à part, avec les piles à deux liquides, celles où le bichromate de potasse est employé conjointement avec un autre liquide et où ils sont séparés l'un de l'autre par une cloison poreuse.

L'une des formes de pile à bichromate les plus répandues est composée d'une lame de zinc amalgamé et de deux lames de charbon qui embrassent la précédente, comme les deux lames de cuivre ou la lame de cuivre recourbée unique de l'élément Wollaston. Le liquide est composé de 100^{gr} de bichromate de potasse que l'on a fait dissoudre dans 1^{lit} d'eau

Fig. 50.



bouillante avec 50^{gr} d'acide sulfurique. Dans la pile de Grenet (*fig.* 50), le vase est une bouteille à large goulot, fermée par un

Digitized by Google

couvercle en caoutchouc durci, lequel porte deux pinces à vis pour attacher les rhéophores. L'une de ces pinces communique avec les charbons C et l'autre avec un manchon en cuivre dans lequel glisse à frottement dur une tige de cuivre soudée au zinc Z. Quand la pile n'est pas en activité, la tige de cuivre est relevée et le zinc sort du liquide. Il n'y a donc aucune usure. Quand on veut établir le courant, on abaisse la tige et le zinc est immergé.

Cette pile n'est pas constante, mais elle est assez intense et convient pour les expériences où l'on fait usage de courants discontinus. A cause de sa forme, on la désigne communément sous le nom de *pile à bouteille*. C'est elle que l'on emploie presque exclusivement pour toutes les expériences de Physique que l'on répète d'ordinaire avec les bobines Ruhmkorff de petites dimensions.

M. Delaurier (*les Mondes*, t. XXII (1870)] a indiqué un mélange plus rationnel que le précédent, à savoir 200^{gr} d'eau, $18^{gr},4$ de bichromate de potasse et $42^{gr},8$ d'acide sulfurique. Ces proportions répondent à la réaction suivante entre le bichromate de potasse, l'acide sulfurique et l'hydrogène :

$$KO, 2CrO^3 + 4SO^3 + 3H = 3HO + KO, SO^3, Cr^2O^3, 3SO^3.$$

L'hydrogène reforme l'eau aux dépens du sel de chrome, et il se forme de l'alun de chrome.

Comme l'hydrogène vient de l'action de l'eau sur le zinc,

$$3SO^3 + 3HO + 3Zn = 3(ZnO, SO^3) + 3H,$$

on obtient les proportions du mélange en ajoutant ces deux équations membre à membre,

$$KO, 2CrO^3 + 7SO^3 + 3Zn = 3(ZnO, SO^3) + KO, SO^3, Cr^2O^3, 3SO^3,$$

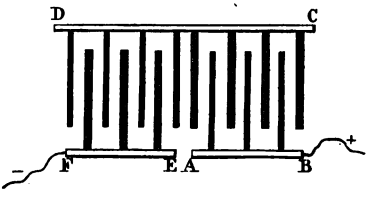
et le second membre montre que finalement on obtient une dissolution de sulfate de zinc et d'alun de chrome, sans qu'il se soit déposé ni hydrogène ni sesquioxyde de chrome sur les lames de l'élément.

Digitized by Google

Le courant que donnent les piles au bichromate de potasse est très intense dans les premiers instants, mais s'affaiblit rapidement, ce qui montre que la dépolarisation n'est pas parfaite.

On a essayé de rendre constantes les piles à bichromate de potasse en agitant le liquide par des bulles d'air introduites à l'aide d'un tube débouchant au fond du bocal. Diverses dispositions ont été réalisées en 1856 par M. Grenet; modifiées ensuite par M. Trouvé, elles se sont répandues dans la chirurgie. Les piles Trouvé de ce système sont très commodes.

Fig. 51.



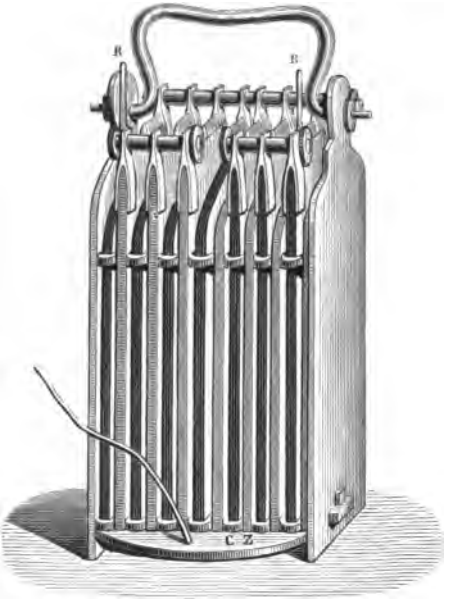
La *fig.* 51 représente un assemblage de 2 éléments en ce qu'il a d'essentiel. Les lames de charbon et celles de zinc sont verticales et alternent entre elles. Des jarretières en caoutchouc entourent les charbons et empêchent le contact avec les zincs. AB est une traverse métallique qui supporte trois lames de charbon : c'est le pôle positif. CD est une deuxième traverse conductrice qui porte quatre lames de zinc et quatre lames de charbon : elle fait donc communiquer le pôle négatif du premier élément avec le positif du deuxième. Enfin, une troisième traverse EF porte trois lames de zinc : c'est le pôle négatif. Cet assemblage, qui forme ainsi deux éléments réunis en tension, est relié par un étrier de caoutchouc durci, qui est muni d'une poignée (*fig.* 52), afin qu'on puisse l'immerger à volonté dans le liquide excitateur ou l'en retirer.

On voit en avant de la figure, et sur le bas, un tube de plomb qui descend jusqu'au fond du vase quand l'élément est immergé dans la dissolution de bichromate. En soufflant de l'air par ce tube de manière à agiter le liquide, on diminue notable

Digitized by Google

ment la polarisation; on peut enfin agiter directement le liquide en soulevant et abaissant alternativement l'assemblage des

Fig. 52.



lames zinc et charbon, que l'on manœuvre alors au moyen de la poignée supérieure.

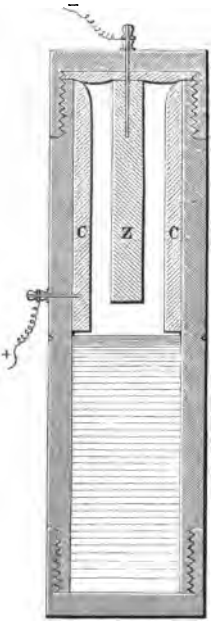
M. Trouvé construit à Paris des piles à fermeture hermétique qui sont très commodes pour un service intermittent. L'élément Trouvé a la forme et la grandeur d'un étui ordinaire (*fig.* 53). C'est une sorte d'étui en caoutchouc durci, avec un couvercle à vis. Ce couvercle porte un petit cylindre de zinc amalgamé, dont la longueur est la moitié de l'étui, et un bouton extérieur sert aux communications. La moitié supérieure de l'étui est garnie d'un cylindre de charbon, lié aussi à un bouton extérieur. On verse du liquide dans l'étui, jusqu'au milieu, de sorte qu'il ne touche pas le zinc. Veut-on faire fonctionner la pile, il suffit de renverser l'étui : le liquide baigne alors le zinc et le charbon, et le courant passe. Quand on a terminé l'ex-

Digitized by Google

périence, on redresse l'étui et l'élément se conserve sans altération.

Dans les usages domestiques, où l'emploi de l'acide sulfu-

Fig. 53



rique peut offrir quelques inconvénients, on peut remplacer ce liquide par une dissolution de bisulfate de potasse. Les sels que l'on dissout pour former le liquide excitateur sont alors composés pour un tiers de bichromate et pour les deux autres tiers de bisulfate de potasse. Ce mélange se trouve maintenant tout préparé dans le commerce.

Nous avons vu que, dans les premiers instants, le courant de la pile à bichromate de potasse est très puissant; on obtient une intensité égale et même supérieure à celle que donnerait un élément de Bunsen. Cette propriété explique l'emploi presque exclusif des piles à bichromate pour l'explosion des torpilles dans les opérations du génie militaire. La pile, n'ayant à fonc-

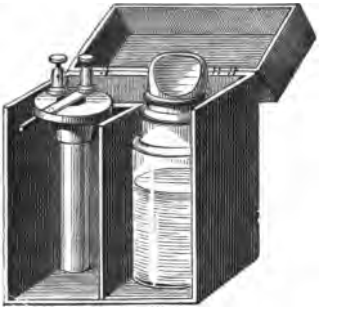
Digitized by Google

tionner chaque fois que pendant le temps très court nécessaire pour rougir un fil de platine fin, se présente sous tous ses avantages.

On donne alors aux piles militaires les dispositions suivantes (¹) :

Le prisme rectangulaire de charbon est placé dans l'axe d'un cylindre creux en zinc ; les deux pièces sont fixées à un couvercle de bois ou de caoutchouc durci. Le liquide excitateur est contenu dans un flacon en verre fermé hermétiquement, et les deux pièces se transportent aisément dans une boîte

Fig. 54.



(*fig.* 54). Pour mettre la pile en action, on n'a qu'à plonger le zinc et le charbon dans le liquide ; on les retire une fois l'explosion produite.

Pour opérer à des distances plus grandes, dans un circuit plus résistant, on emploie une pile à trois éléments associés en tension. Elle se compose d'un bloc de caoutchouc durci, creusé de trois trous qui sont (*fig.* 55) remplis à moitié de la dissolution ; au-dessus est un couvercle fermant hermétiquement, portant les trois couples zinc-charbon, mais dont la longueur est telle qu'ils ne plongent pas dans le liquide quand la pile est tenue droite dans sa position normale. On met la pile

(¹) Picardat, *Les Mines dans la guerre de campagne ;* Gauthier-Villars, 1874.

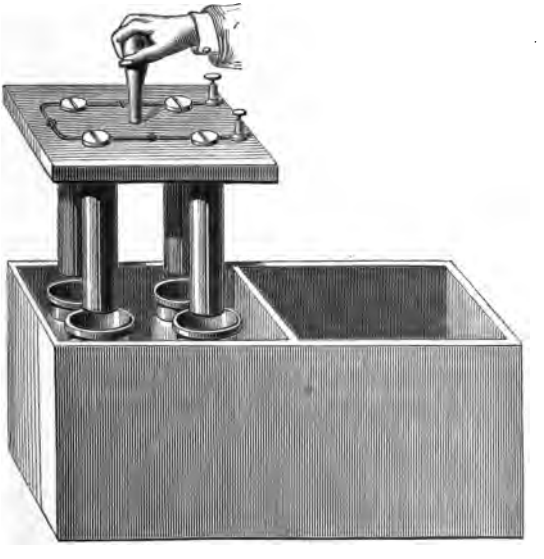
Digitized by Google

en activité en la renversant le couvercle en bas, de façon que le liquide vienne baigner les couples.

Fig. 55.

Enfin, pour mettre le feu simultanément à plusieurs amorçes,

Fig. 56.

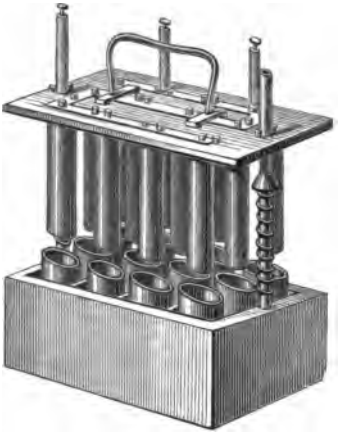


on se sert de piles à 4, à 8 et à 12 éléments. Les *fig.* 56

Digitized by Google

et 57 représentent les piles à 4 et à 12 éléments, pour lesquelles il n'est pas nécessaire de donner de nouvelles explications. Les vases, remplis d'avance du liquide excitateur, sont disposés

Fig. 57.



dans une caisse à fermeture hermétique, et les couples sont portés par une même tablette, de sorte qu'on les plonge d'un seul coup dans le liquide, et qu'on les retire dès que l'opération est terminée.

M. Byrne [*Lumière électrique*, p. 18 (1880)] croit plus avantageux de remplacer, dans les piles à bichromate de potasse, le charbon par une lame de platine platiné, et le bichromate de potasse lui-même par du bichromate de chaux; mais les nombres que cite l'auteur en faveur de son invention ne paraissent pas pouvoir être admis d'une manière définitive.

M. Chutaux remplace, dans la pile à bichromate, la dissolution ordinaire par un liquide formé de :

Eau.....	1500^{gr}
Bichromate de potasse.....	100
Bisulfate de mercure	50
Acide sulfurique à 66°.....	200

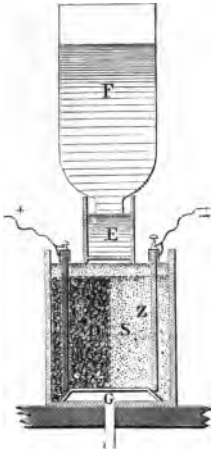
Ce liquide donne une force électro-motrice un peu inférieure

Digitized by Google

à celle de la pile à bichromate ordinaire, mais la polarisation semble moindre; on peut, du reste, la diminuer notablement en faisant circuler continuellement le liquide excitateur.

Dans l'une des dispositions variées de la pile Chutaux (*fig.* 58),

Fig. 58.



la lame de zinc Z et la lame de charbon C sont entourées respectivement de sable S et de poussière de charbon D. Une couche de sable recouvre le tout et porte un vase poreux E qui contient le liquide excitateur. Un flacon F rempli du même liquide est renversé sur le vase poreux, afin d'entretenir l'écoulement. Le liquide traverse lentement l'élément et sort par un orifice pratiqué au fond du bocal. Une soucoupe renversée G retient le sable et la poussière de charbon et les empêche d'obstruer l'orifice.

On peut disposer plusieurs éléments en colonne verticale, de façon que le liquide tombe de chaque élément dans l'élément placé au-dessous.

M. Chutaux a constaté que le même liquide peut passer quatre fois de suite dans un élément sans affaiblissement notable. On peut, d'après cela, disposer 4 éléments les uns au-dessous des autres; mais il est plus prudent de se borner à 2.

Digitized by Google

On a fait varier, du reste, la forme des lames de zinc et de charbon pour augmenter leur surface et diminuer la résistance, laquelle peut devenir aussi faible que celle de l'élément Bunsen. Cette pile a été employée pendant le siège de Paris pour produire de la lumière électrique ; elle est moins coûteuse que la pile Bunsen, mais moins énergique et beaucoup plus irrégulière. Elle permet cependant, quand on n'a pas besoin d'une grande constance, de réaliser une économie notable.

Au lieu de bichromate de potasse, M. Delaurier propose [*les Mondes*, t. XXII (1870)] un liquide plus économique, formé de :

Eau.....	36	parties.
Sulfate de protoxyde de fer..	20	»
Acide sulfurique.....	7	»
Acide azotique.....	1	»

Sous l'action des acides sulfurique et azotique, le sulfate de protoxyde de fer se transforme partiellement en sulfate de sesquioxyde ; en même temps, l'acide azotique est ramené à l'état de bioxyde d'azote, qui se dissout dans l'excès de sulfate de protoxyde de fer. Ce bioxyde d'azote absorbe l'hydrogène dégagé par l'attaque du zinc, et il se forme de l'ammoniaque et même du sulfate d'ammoniaque en présence de l'excès d'acide sulfurique. Le tout est exprimé par les équations suivantes :

$$6(FeO, SO^3) + AzO^5 + 9SO^3 = 3(Fe^2O^3, 3SO^3) + AzO^2,$$
$$AzO^2 + 5H = AzH^3 + 2HO.$$

Les proportions indiquées plus haut représentent $9^{éq}$ d'acide sulfurique, $1^{éq}$ d'acide azotique et $8^{éq}$ de sulfate de fer, au lieu de $6^{éq}$ qu'indique la formule, afin qu'il y en ait toujours un excès pour dissoudre le bioxyde d'azote.

Pour préparer le liquide, il importe de suivre un certain ordre. On dissout d'abord le sulfate de protoxyde de fer dans la quantité d'eau indiquée, et autant que possible à l'abri du contact de l'air ; on ajoute lentement l'acide sulfurique en agitant, puis enfin l'acide azotique par petites portions et en agitant

Digitized by Google

toujours. Il se forme alors peu à peu du sulfate de sesquioxyde de fer et du bioxyde d'azote, qui est absorbé à mesure qu'il se produit par l'excès de protosulfate.

Si l'on essayait de faire l'inverse en versant le sulfate dans le mélange des acides, presque tout le bioxyde d'azote se dégagerait, donnerait en arrivant à l'air une quantité de vapeurs très dangereuses d'acide hypoazotique, et, de plus, le liquide serait manqué.

Voici un autre essai du même auteur, cherchant un système dépolarisant économique. Cette fois, l'élément est formé par le fer et le zinc.

On met dans un vase de fer une pâte de chaux hydratée, de fleur de soufre et de sel marin, délayés dans l'eau suivant certaines proportions qui ne sont pas indiquées dans le Mémoire. Au milieu on dispose un cylindre de zinc sur un corps mauvais conducteur, pour empêcher le contact avec le fer. Il se forme du chlorure double de zinc et de sodium, du zincate de soude et du sulfure de calcium. Si l'on ne mettait pas de chaux, il se dégagerait de l'acide sulfhydrique, qui serait gênant.

D'après l'auteur, cette pile ne donne lieu à aucun dégagement gazeux et elle est très durable, mais son intensité est faible.

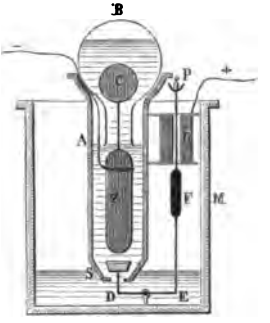
Enfin nous citerons encore, mais seulement pour montrer quelle complication vont souvent chercher les auteurs, et d'une manière bien inutile, une dernière pile imaginée par Delaurier; la constance y est obtenue par l'écoulement du liquide excitateur (*fig.* 59).

Cette pile se compose d'un vase en cuivre doré A, s'ouvrant par le bas au moyen d'une soupape conique S et contenant le cylindre massif de zinc Z. Le vase de cuivre est fermé en dessus par un ballon de verre B qui contient le liquide excitateur; celui-ci s'écoule dans le vase A dès que le niveau s'abaisse au-dessous de l'ouverture du col du ballon. Le liquide sortant du vase A par la soupape inférieure est recueilli dans une auge M, en bois par exemple, dans laquelle est placé tout l'élément.

Digitized by Google

Pour ménager l'écoulement du liquide de manière à obtenir un courant absolument constant, M. Delaurier attache la soupape S à la tige d'un levier coudé DE, dont une branche se re-

Fig. 59.



lève verticalement et porte un petit cylindre de fer doux F. Ce cylindre est un peu au-dessous d'une bobine G, dans laquelle circule le courant de la pile. Si celui-ci vient à augmenter d'intensité, l'attraction de la bobine sur F s'accroît, ce qui abaisse la soupape S, diminue l'écoulement du liquide, et par suite l'intensité du courant. Le contraire a lieu si le courant diminue. Le tout a été réglé primitivement au moyen de poids P portés dans un plateau situé en haut de la tige du levier régulateur.

Comme liquide excitateur, on emploie soit le liquide au bichromate de potasse, soit le mélange au bioxyde d'azote.

Cette pile donne un courant énergique et parfaitement constant ; mais sa complication et la difficulté qui en résulte pour la monter en rendent l'usage peu pratique.

La pile Figuier [*les Mondes*, t. III (1863)] est une pile à un liquide dont les électrodes sont une lame métallique (zinc, ou mieux encore fer), et une lame de charbon ; ces deux lames plongent dans une dissolution d'un ou de plusieurs sels de fer au maximum.

La meilleure manière d'obtenir ce liquide consiste à faire passer un courant de chlore à refus dans une dissolution saturée de sulfate de fer du commerce.

Digitized by Google

Il se forme un mélange de perchlorure de fer et de sulfate de peroxyde

$$6(FeO, SO^3) + 3Cl = 2(Fe^2O^3, 3SO^3) + Fe^2Cl^3.$$

L'hydrogène mis en liberté par la décomposition de l'eau rencontre les sels de fer au maximum et les réduit, ce qui empêche toute polarisation. Aussi cette pile est-elle assez constante pour avoir donné pendant trois jours un dégagement de gaz bien régulier au voltamètre.

Elle est, de plus, assez puissante : c'est ainsi qu'un seul élément décompose l'eau avec énergie, ce que ne fait pas l'élément Daniell, et donne, d'après l'auteur, des étincelles par le simple rapprochement des fils conducteurs (?).

Quand la pile a fonctionné quelque temps, et qu'une trop grande quantité de sels de fer a été réduite, il suffit, pour la remettre en état, de faire passer un nouveau courant de chlore dans la dissolution des sels de fer.

M. Héraud [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXVIII (1879)] emploie le protochlorure de mercure (calomel) comme substance dépolarisante. Le zinc plonge dans une dissolution de sel ammoniac. Il se forme alors du chlorure de zinc, de l'ammoniaque et de l'hydrogène, d'après la formule

$$AzH^4Cl + Zn = ZnCl + AzH^3 + H;$$

l'ammoniaque et l'hydrogène, agissant sur le calomel, déposent du mercure et régénèrent le chlorhydrate d'ammoniaque

$$AzH^3 + H + Hg^2Cl = 2Hg + AzH^4Cl.$$

Théoriquement, la dépolarisation serait donc complète.

En réalité, la réaction est beaucoup plus complexe, et il se forme divers produits, entre autres de l'oxychlorure de zinc ammoniacal qui tend à se déposer sur le zinc. Pour prévenir ce dépôt il faut étendre la solution de sel ammoniac d'un dixième de son volume de dissolution d'ammoniaque du commerce. L'élément est alors bouché soigneusement pour empêcher l'évaporation de l'ammoniaque.

Digitized by Google

Cet élément a fonctionné aux essais pendant neuf mois sans être renouvelé, et au bout de ce temps le zinc amalgamé était encore parfaitement net et brillant. La résistance de l'élément augmente un peu avec le temps et la force électro-motrice diminue; mais le prix relativement élevé du chlorure de mercure sera toujours un obstacle à l'emploi de cette pile, surtout maintenant que l'on obtient la dépolarisation avec des substances solides bien moins coûteuses, comme le bioxyde de manganèse et le chlorure de chaux.

Digitized by Google

CHAPITRE TROISIÈME.

SECONDE CLASSE. — PILES A DEUX LIQUIDES.

Volta a remarqué le premier que deux liquides et un seul métal peuvent donner naissance à un courant électrique. Les deux liquides étaient séparés l'un de l'autre par une cloison poreuse, incapable d'exercer une action chimique sur eux, et dans chaque liquide était plongée une lame du métal.

Becquerel père étudia la production de l'électricité par le contact de deux liquides différents, dans des circonstances très variées [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. IV (1837); *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. LXVI (1837) et 3e série, t. III (1841)].

Dans un vase de verre contenant de l'acide azotique, il plaçait un vase poreux, rempli d'une dissolution de potasse. Une lame de platine était plongée dans chacun des liquides. En réunissant ces deux lames par un conducteur, on obtenait un courant en même temps que la combinaison lente de l'acide avec la potasse.

C'est la première pile à deux liquides qui ait été employée; le courant y diminue peu à peu d'intensité, surtout parce qu'il se forme des cristaux dans l'épaisseur du vase poreux. Ces cristaux font quelquefois éclater le vase; aussi Becquerel le remplaça-t-il bientôt par une couche d'argile humide.

En 1829, Becquerel [*Annales de Chimie et de Physique*, t. XLI (1829)] construisit une pile cloisonnée à deux liquides et deux métaux. Elle se composait d'un vase de verre séparé en deux compartiments par une feuille de baudruche. Dans l'un étaient placées une dissolution d'azotate de cuivre et une lame de cuivre; dans l'autre, il y avait une dissolution

Digitized by Google

d'azotate de zinc et une lame de zinc. Cette pile est presque identique à celle qui a été connue depuis sous le nom de *pile de Daniell;* toutefois, elle est un peu moins constante.

En 1830, Wach [*Schweigger Journal,* t. LVIII (1830)] sépara un vase en deux compartiments par une membrane animale; il mit d'un côté une dissolution de sulfate de cuivre et une lame de cuivre, de l'autre de l'eau, ou bien une dissolution de sel ammoniac et une lame de zinc. C'est exactement la disposition adoptée plus tard par Daniell; mais Wach ne se servit de son appareil que pour étudier l'endosmose des liquides et la précipitation des métaux; il ne se douta pas de la véritable utilité de la disposition qu'il avait imaginée.

Le but qu'on veut atteindre dans toutes les piles à deux liquides est d'empêcher complètement la polarisation en interposant entre la partie négative de l'élément et la partie positive un liquide *dépolarisateur* qui soit sans action chimique sur le corps conducteur servant de pôle positif. Pour empêcher le mélange des deux liquides, il faut généralement les séparer par une cloison poreuse, qui n'offre pas une trop grande résistance au passage du courant, et qui cependant soit assez épaisse pour que la diffusion soit très lente.

Pour que l'intensité du courant soit constante, il ne suffit pas d'avoir détruit la polarisation, il faut encore que la résistance soit constante. Cette dernière condition, extrêmement difficile à remplir, exige que la nature des liquides ne change pas, soit au point de vue chimique, soit au point de vue du degré de concentration.

De là résulte une classification rationnelle des piles à deux liquides. La première classe comprendra les piles où les liquides ne changent pas sensiblement de composition chimique; la seconde, celles où ils subissent des modifications chimiques notables qui changent leur résistance.

Digitized by Google

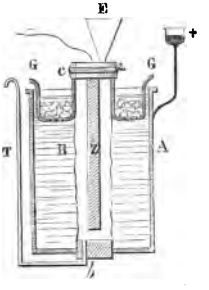
PREMIÈRE SECTION. — PILES A DEUX LIQUIDES DE COMPOSITION CHIMIQUE INVARIABLE.

§ I. — Type de Daniell.

Après la pile de Becquerel citée plus haut, la première dans laquelle on ait remédié à tous les défauts des piles à un liquide et qui donne un courant réellement constant est la pile de Daniell [*Philosophical Transactions*, t. I (1836); *Poggendorff's Annalen*, t. XLII, LI, LV, LVIII, LX].

Sa forme primitive est la suivante (*fig.* 60).

Fig. 60.



Un vase cylindrique de cuivre A a le fond percé d'un trou fermé par un bouchon *b*; sur ce bouchon est fixé un boyau de bœuf B, maintenu à sa partie supérieure par un collier *c*, qui fait partie d'une grille annulaire G, dont les bords reposent sur ceux du vase A.

Le boyau B est rempli d'eau acidulée sulfurique, et l'on y fait plonger un cylindre de zinc amalgamé Z. On emploie de l'eau acidulée de 5 à 10 pour 100 d'acide sulfurique; en augmentant la proportion d'acide, le liquide serait meilleur conducteur, ce qui diminuerait la résistance et augmenterait, par suite, l'intensité du courant; mais l'action deviendrait trop violente.

Digitized by Google

Dans le vase A est une dissolution de sulfate de cuivre que l'on entretient à l'état de saturation en mettant des cristaux de sulfate sur la grille G.

Au zinc est soudé un fil de cuivre comme rhéophore négatif; le vase de cuivre A porte à son extérieur une tige de cuivre terminée par un godet à mercure dans lequel plonge le fil qui sert de rhéophore positif.

Grâce à cette disposition, le zinc ne peut plus aller se déposer sur le cuivre, et l'hydrogène, dès qu'il quitte le diaphragme B, rencontre la dissolution de sulfate de cuivre, qu'il réduit. Il se forme de l'acide sulfurique qui peut passer à travers la cloison B et y entretenir l'acidité de l'eau, et il se produit un dépôt de cuivre qui ne fait qu'augmenter l'épaisseur du vase A. Au moyen des cristaux contenus sur la grille G, la dissolution de sulfate de cuivre reste toujours saturée.

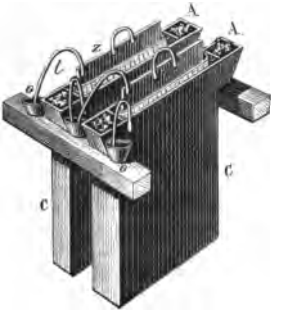
De cette manière il n'y a pas de polarisation possible, et les différentes parties de la pile sont toujours dans le même état; le courant doit donc être constant. Il y a encore cependant une petite cause de perturbation : l'eau acidulée du vase B se charge peu à peu de sulfate de zinc, ce qui change sa composition. Pour obvier à cet inconvénient, Daniell perçait le bouchon *b* d'un trou par lequel passait un tube recourbé T. Au moyen d'un entonnoir E, on faisait tomber goutte à goutte de l'eau acidulée dans le vase B; la dissolution de sulfate de zinc, en raison de sa densité, tombait au fond du vase et s'écoulait par le tube T.

Construite avec ces précautions, la pile de Daniell était remarquablement constante; mais la dernière disposition surtout était très incommode; aussi on la supprima bientôt aux dépens, il est vrai, de la constance, et il est bon alors de renouveler de temps en temps l'eau acidulée. Pour diminuer la place occupée par l'élément Daniell et augmenter en même temps les surfaces métalliques en présence, Péclet [*l'Institut*, t. VII (1839)] a indiqué l'emploi de caisses plates en cuivre, de $0^m,03$ de largeur, dans lesquelles on met le sulfate de cuivre. Au centre se place un sac de peau de mouton tannée, dans lequel

Digitized by Google

est une large lame de zinc plongeant dans l'eau acidulée (*fig.* 61). Cette disposition rapproche beaucoup les deux lames métalliques et diminue ainsi la résistance de la pile. De plus,

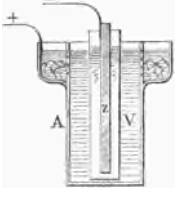
Fig. 61.



le sac de peau de mouton s'altère beaucoup moins que les vessies employées antérieurement comme diaphragmes, tout en produisant le même effet.

La pile de Daniell prit ensuite la forme suivante (*fig.* 62) : un vase de cuivre A, contenant la dissolution de sulfate de

Fig. 62.



cuivre et des cristaux dans un sac ou sur une grille; au centre du vase A un vase de terre poreuse V, contenant de l'eau acidulée et un bâton Z de zinc amalgamé, qui ne s'use pas quand le circuit est ouvert. Cette forme de la pile Daniell est encore employée fréquemment dans la télégraphie, à cause de sa simplicité et du petit nombre de pièces qui la composent.

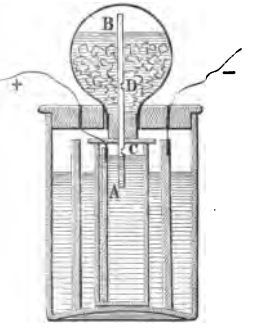
Un grand nombre de modifications de détail ont été apportées à la pile Daniell. D'abord on a proposé de donner au zinc la forme de deux lames en croix; de la sorte, la grandeur du

Digitized by Google

zinc est augmentée et la quantité d'eau acidulée est moins grande; la résistance de l'élément est un peu diminuée, il est vrai, mais en revanche la quantité de liquide est petite et les changements de composition des dissolutions sont plus rapides, ce qui est un inconvénient.

Comme le vase de cuivre était relativement assez coûteux et nécessitait une construction spéciale, on le remplaça bientôt par un vase de verre ou de terre dans lequel plongeait une lame de cuivre repliée en forme de cylindre creux, ouvert longitudinalement suivant une de ses génératrices. Puis on renversa la pile en mettant au centre, dans le vase poreux, le sulfate de cuivre et une lame de cuivre, et dans le vase de terre l'eau acidulée avec un cylindre de zinc amalgamé. Avec cette dernière disposition, le renouvellement du sulfate de cuivre peut se faire à l'aide d'un ballon renversé, rempli de cristaux de sulfate de cuivre et d'une solution du même sel. C'est ce qu'ont fait d'abord Parelle, puis Vérité et Breguet, et ils ont obtenu des piles fonctionnant pendant six mois sans interruption. Dans la *pile à ballon* de Breguet, le ballon renversé est supporté par un couvercle en bois placé sur le vase poreux (*fig.* 63). Il est fermé par un bouchon que traverse un tube

Fig. 63.



AB percé de deux ouvertures, l'une C par laquelle l'air peut rentrer dans le ballon, l'autre D par laquelle le liquide descend dans le vase poreux. De cette façon il n'y a jamais d'obstruc-

Digitized by Google

tion et l'orifice de déversement se trouve toujours immergé.

On peut remplacer l'eau acidulée sulfurique par plusieurs liquides. La dissolution de sulfate de zinc donne une force électro-motrice un peu moindre, mais un courant plus constant, puisque les changements de composition des liquides sont alors beaucoup moins grands. L'eau pure, qui augmente beaucoup la résistance, donne un courant beaucoup moins fort, mais permet d'employer le zinc ordinaire, qu'elle n'attaque que très lentement quand la pile ne fonctionne pas; c'est pour cette raison qu'on emploie l'eau pure sur quelques lignes télégraphiques. L'eau salée, au contraire, accroît la force électro-motrice dans le rapport de 100 à 106; la dissolution de potasse caustique l'accroît dans celui de 100 à 138; mais cette dernière dissolution ne doit pas être employée au moins dans les conditions ordinaires [1], car elle donne naissance à de l'hydrate d'oxyde de zinc, qui forme bientôt à la surface du zinc une couche insoluble et arrête l'action.

Pour rendre la pile plus économique, Spencer a proposé de remplacer la lame de cuivre par un cylindre cannelé de papier de plomb qui, aussitôt son immersion dans le sulfate, se recouvre d'une couche de cuivre et fonctionne dès lors comme un cylindre de cuivre.

Grove remplace la lame de cuivre par une lame de fer, qui se recouvre également d'un dépôt de cuivre. Il remplace en même temps la lame de zinc par une autre lame de fer; les réactions chimiques de la pile restent les mêmes, mais la force électro-motrice de cet élément à deux lames de fer n'est plus que les 0,46 de celle de l'élément Daniell ordinaire.

Pour diminuer la résistance de la pile, on a essayé d'employer des cylindres de cuivre cannelés, dont les côtes arrivent très près du vase poreux, ce qui diminue l'épaisseur de liquide que le courant doit traverser.

Ryhiner [*Fortschritte* (1848)] a réuni plusieurs de ces modi-

---

[1] Nous verrons plus tard que la potasse ou la soude caustique sont employées avec succès dans la pile Reynier.

Digitized by Google

fications dans la pile qu'il propose pour la galvanoplastie. Cette pile se compose d'un vase de fonte cannelé intérieurement, contenant une dissolution de sel marin; au centre est un vase poreux avec la dissolution de sulfate de cuivre; on prend comme électrode positive une lame de plomb qui se recouvre promptement d'un dépôt de cuivre chimiquement pur que l'on peut enlever de temps en temps.

Mais toutes ces modifications n'ont jamais été d'un emploi général et ne sont pas parvenues à remplacer la pile Daniell ordinaire.

Un inconvénient assez sérieux de cette pile est que le vase poreux se recouvre rapidement de dépôts très adhérents de cuivre qui ont l'apparence de végétations; les mêmes dépôts se produisent aussi dans l'intérieur du vase et en rompent les cellules. De la sorte une communication métallique finit par s'établir directement entre le cuivre et le zinc.

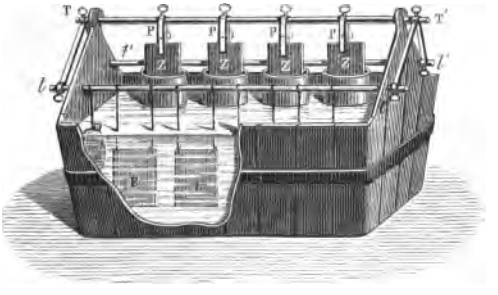
Cette communication s'établit encore par les boues métalliques qui se produisent dans la pile. A mesure que le zinc se dissout, les corps moins altérables qui le souillent, tels que fer, plomb, cadmium, cuivre, charbon, etc., se déposent peu à peu au fond du vase; en arrivant au contact du vase poreux et du sulfate de cuivre, ces boues forment de petits éléments locaux qui produisent une réduction inutile de sulfate et augmentent la consommation de zinc. Il est impossible d'éviter complètement ces inconvénients; on les diminue cependant d'une manière notable en ayant soin de suspendre le bâton de zinc bien au milieu du vase poreux; de la sorte, les végétations ne se produisent plus guère que vers le fond du vase, que l'on a préalablement recouvert de cire. Enfin, en montant l'élément, il faut verser d'abord l'eau acidulée, afin de donner le temps au vase poreux de bien s'en imbiber avant de le mettre au contact du sulfate.

Bourseul prétend empêcher les incrustations dans l'élément à cuivre intérieur en soudant au milieu de la lame de cuivre une spirale de même métal qui touche par tout son contour l'intérieur du vase poreux.

Digitized by Google

On a proposé successivement de remplacer le vase de terre poreux par des cylindres de parchemin, de papier, de cuir, de vessie, de plâtre, de bois d'érable chauffé avec de l'acide sulfurique, etc. Ces différents diaphragmes sont en général moins commodes que les vases poreux que l'on trouve en grande quantité et à bon marché dans le commerce, mais il y a cependant des cas où l'on est forcé de les employer. Pour la galvanoplastie, par exemple, on fait des diaphragmes de très grande taille en toile à voile ou en papier parchemin; les diaphragmes en terre poreuse de même taille ne se trouveraient pas dans le commerce et seraient trop coûteux. L'*appareil simple* que l'on emploie dans la plupart des fabriques de galvanoplastie n'est que l'élément Daniell ordinaire, modifié pour son nouvel usage. Il se compose (*fig.* 64) d'une cuve contenant la disso-

Fig. 64.



lution de sulfate de cuivre, dans laquelle plongent des sacs de toile pleins de cristaux de sulfate pour maintenir la liqueur saturée; au centre on suspend un ou plusieurs diaphragmes en toile à voile contenant de l'eau salée et un cylindre de zinc auquel est soudé un fil de cuivre qui communique avec des traverses de cuivre reposant sur les bords de la cuve. A ces traverses sont attachés par des fils de cuivre les moules rendus conducteurs sur lesquels on veut produire le dépôt de cuivre, et qui jouent le rôle de la lame de cuivre de l'élément Daniell ordinaire ou des lames de plomb qu'on y substitue.

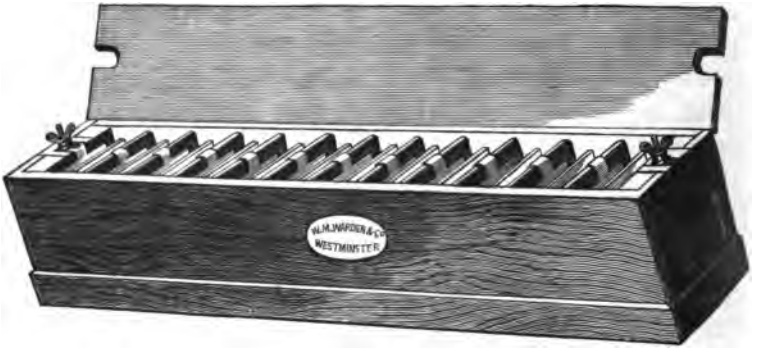
L'appareil consiste donc en une pile Daniell dont le circuit

Digitized by Google

extérieur est très court, et, au lieu d'utiliser le courant extérieur, on ne fait usage que du courant intérieur de l'élément.

On fait un grand usage, dans les télégraphes anglais, d'une pile de Daniell composée de plusieurs éléments réunis dans une même boîte et dite *pile à auge*. Une boîte rectangulaire en bois est divisée dans le sens de la longueur en dix compartiments au moyen de plaques d'ardoise (*fig.* 65); chaque comparti-

Fig. 65.



ment est séparé lui-même en deux par une plaque de porcelaine poreuse. On met alternativement dans chaque cellule une dissolution de sulfate de cuivre avec quelques cristaux et de l'eau pure ou une dissolution très faible de sulfate de zinc. Les lames de cuivre et de zinc sont réunies deux à deux par une patte de cuivre que l'on place à cheval sur les cloisons d'ardoise, de façon que la lame de cuivre plonge dans la dissolution de sulfate du même métal. Enfin on termine la pile aux deux extrémités par une lame de zinc et une lame de cuivre auxquelles sont attachées les extrémités du circuit extérieur.

Cette pile occupe peu de place et, comme la boîte peut être fermée avec un couvercle, l'évaporation des liquides est peu active et la formation des sels grimpants est lente et peu gênante.

La pile Muirhead n'est qu'une pile Daniell ordinaire dont les vases, aussi bien le vase extérieur que le vase poreux, sont rec-

Digitized by Google

tangulaires et aplatis. Le vase extérieur est double, c'est-à-dire formé par la réunion de deux vases parfaitement distincts l'un de l'autre, mais accolés par une de leurs grandes parois, ce qui diminue la place occupée par la pile en même temps que le prix d'achat. Cette pile est également très employée par l'administration des télégraphes anglais.

La pile de Daniell est constante et sa force électro-motrice ne varie pas du onzième de sa valeur tant que la dissolution de sulfate de cuivre reste colorée, c'est-à-dire qu'elle contient encore du cuivre; mais elle présente plusieurs inconvénients.

Comme les dissolutions arrivent promptement à la saturation si elles ne sont pas saturées dès l'abord, on est très exposé à la formation de sels grimpants dont nous avons déjà dit un mot à propos des piles Leclanché. Pour s'en garantir autant que possible, il faut que les vases poreux soient vernissés à la partie supérieure; il faut, de plus, enduire le haut des deux vases, aussi bien du vase poreux que du vase extérieur, d'une substance grasse, cire ou paraffine. Si, malgré ces précautions, des sels grimpants se montraient, on devrait les enlever avant qu'ils débordent autour des vases.

Mais le plus grave défaut de la pile de Daniell, quelle que soit sa forme, est qu'il s'y produit une usure constante, même quand le circuit est ouvert. Du sulfate de cuivre passe en effet peu à peu à travers la cloison poreuse, et, arrivé au contact du zinc, se réduit et y dépose du cuivre métallique. Celui-ci forme avec le zinc une pile locale qui travaille constamment en usant du zinc, de sorte que l'on perd inutilement à la fois du sulfate de cuivre et du zinc. Cette usure incessante augmente notablement les frais d'entretien de la pile Daniell et fait qu'on lui préfère souvent des éléments moins constants, mais où l'on n'a pas à craindre de dépense inutile quand le circuit est ouvert.

Sans rien changer d'essentiel dans les dispositions générales de la pile de Daniell, on a proposé successivement un grand nombre de modifications de détail pour développer telle ou telle qualité utile relativement aux applications particulières que les auteurs avaient en vue.

Digitized by Google

Pour produire de la lumière électrique, il faut en général une pile de faible résistance et de grande force électro-motrice. M. Carré [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVI (1869)] a cherché à donner l'une de ces qualités, la faible résistance, à la pile de Daniell, au moyen de la disposition suivante.

Dans un vase cylindrique de $0^m,12$ de diamètre et de $0^m,60$ de hauteur est un zinc, haut de $0^m,55$, porté sur un croisillon et isolé par lui des boues métalliques qui tombent au fond du vase et produiraient l'incrustation en venant toucher le diaphragme. Ce diaphragme est formé de papier parchemin (papier passé à l'acide sulfurique) ou, à son défaut, de papier imprégné d'albumine surcoagulée à 230°, ce qui le rend absolument inattaquable par les liquides de la pile. Ce papier est collé sur lui-même en forme de cylindre, avec de la gomme laque, et il est collé également à la partie inférieure sur un godet de terre ou d'une matière non conductrice quelconque, qui lui sert de pied et repose sur le croisillon.

A l'intérieur du diaphragme se place une carcasse cylindrique de même hauteur, formée de baguettes de bois espacées de $0^m,003$ à $0^m,004$, assemblées sur un fond de bois et, au sommet, sur un cercle de cuivre qui les réunit et reçoit le fil polaire extérieur. Entre ce cercle de cuivre et le disque du fond on tend des fils de cuivre de $0^{mm},7$ à $0^{mm},8$ de diamètre, qui entourent toute la carcasse d'une espèce de réseau sur toutes les parties duquel le cuivre se dépose bien régulièrement.

On remplit ensuite l'intérieur de la carcasse, sur toute la hauteur du diaphragme, de cristaux de sulfate de cuivre, qui forment une colonne que le liquide intérieur baigne sur une grande surface. De la sorte, la dissolution est toujours saturée dans toute la hauteur du diaphragme, ce qui assure le maximum d'effet. La carcasse et le cercle collecteur de cuivre peuvent servir indéfiniment; quand le fil du réseau est trop surchargé de cuivre, on le remplace avec la plus grande facilité.

Le meilleur liquide extérieur est une solution de sulfate de zinc à 18° de l'aréomètre de Baumé, légèrement acidulée. Elle

Digitized by Google

fournit un dégagement d'électricité très sensiblement constant, jusqu'à ce qu'elle atteigne une densité de 40°. Il suffit alors, pour maintenir la constance, d'en enlever une partie et de la remplacer par de l'eau pure. En mêlant ce liquide à un dixième de son volume d'une solution saturée de sel ammoniac, on obtient, sans aucun inconvénient, un courant un peu plus intense.

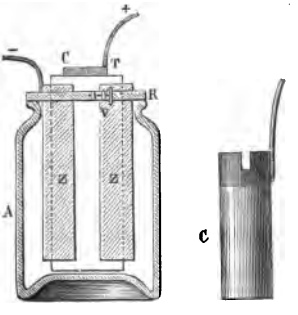
Cet élément peut fonctionner avec la même intensité jusqu'à l'usure complète du zinc, c'est-à-dire pendant environ deux cents heures, consécutivement ou avec intermittences. Sous les dimensions indiquées, il dégage plus d'électricité qu'un élément Bunsen de dimensions moyennes. Dans un voltamètre à sulfate de cuivre, il dépose facilement de 9^{gr} à 10^{gr} de cuivre par heure, par la dissolution d'une quantité sensiblement égale de zinc.

Le poids moyen de zinc dissous par élément et par heure dans deux expériences de lumière prolongées a été de 9^{gr} à 10^{gr}.

Cette pile a été employée avec succès pour produire de la lumière électrique au laboratoire de Physique de M. Jamin, à la Sorbonne.

La pile de T. Bertelli [*les Mondes*, t. VII (1865)] se compose

Fig. 66.



d'un vase de verre A, de 0^{m},25 de haut et de 0^{m},12 d'ouverture, dont le fond se relève au centre de 0^{m},03 (*fig.* 66). Dans ce vase plonge un cylindre de zinc amalgamé Z de 0^{m},24 de haut et de 0^{m},10 de diamètre; ce cylindre est serré au moyen d'une

Digitized by Google

vis V par un collier de cuivre R, auquel on a soudé trois traverses qui le font reposer sur le bord du vase A et tiennent ainsi le zinc suspendu.

Sur l'élévation du fond du vase A repose un cylindre de terre poreuse T, de $0^m,20$ de haut et $0^m,08$ de diamètre; dans ce cylindre est un autre vase cylindrique C de cuivre, de $0^m,20$ de haut et de $0^m,06$ de diamètre. A sa partie supérieure, ce cylindre porte deux entailles *a*, diamétralement opposées, de $0^m,02$ de haut et de $0^m,003$ d'ouverture; de plus, toute la partie de ce cylindre où sont situées les entailles et les soudures est recouverte de cire vierge. Dans le vase C, on met des cristaux de sulfate de cuivre jusqu'à $0^m,01$ environ au-dessous des entailles; puis on remplit les trois vases, exactement à la même hauteur et jusqu'un peu au-dessus des entailles, d'eau acidulée à raison de 2^{gr} d'acide sulfurique pour 1^{lit} d'eau.

Cette pile a été employée dans un couvent de Parme pour faire marcher un appareil télégraphique; 2 éléments suffisent pour faire fonctionner énergiquement le modèle de télégraphe Morse qui se trouve dans les cabinets de Physique.

D'après l'auteur, les avantages de cette pile sur la pile Daniell sont qu'il n'y a plus d'incrustation de cuivre dans les diaphragmes, plus de courants secondaires, ni de mélange de sulfate de zinc et de sulfate de cuivre. Cette pile donne un courant presque absolument constant, qu'on s'en serve pour un circuit interrompu ou toujours fermé. Elle sera donc bonne pour les télégraphes, les horloges électriques, la galvanoplastie et, en général, pour toutes les expériences qui demandent de la constance et de la durée.

Une condition importante dans la pile Daniell est d'empêcher le sulfate de cuivre de traverser la cloison poreuse, afin d'éviter tout dépôt de cuivre sur le zinc. Pour cela, le P. Secchi [*Cosmos*, t. XV (1859)] propose de maintenir toujours le niveau du sulfate de cuivre au-dessous de celui de l'eau acidulée, au moyen de la disposition suivante.

Le vase extérieur, en verre, contient l'eau acidulée et le zinc; on maintient constamment ce dernier amalgamé en laissant

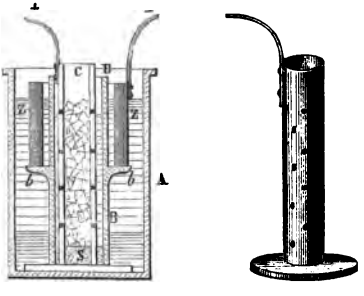
Digitized by Google

un peu de mercure au fond du vase. Au centre est le vase poreux, contenant, comme d'ordinaire, le sulfate de cuivre et la lame de cuivre. Dans ce vase est un siphon dont la courte branche plonge dans le sulfate de cuivre et qui débouche par sa grande branche dans un petit verre à pied, dont l'ouverture supérieure doit être à la hauteur du niveau que l'on veut conserver dans le vase poreux. Enfin, ce petit verre est placé dans un vase plus grand, qui reçoit le trop-plein du liquide. Grâce à cette disposition, le niveau reste, dans le vase poreux, constamment au-dessous de celui de l'eau acidulée, malgré l'endosmose, qui, avec la pile ordinaire, élèverait toujours le niveau intérieur. De la sorte, on prévient tout passage de sulfate de cuivre dans le vase extérieur, les seuls courants qui puissent avoir lieu étant dirigés de l'extérieur vers l'intérieur du vase poreux, si le niveau du liquide est suffisamment bas dans ce dernier.

Cette disposition assure un fonctionnement plus régulier de la pile et réalise en même temps une économie, puisqu'il n'y a plus de consommation inutile de cuivre; mais le montage des éléments est plus long et plus difficile.

L'abbé Candido [*Les Mondes*, t. XIII (1867)] modifie la pile de Daniell en conservant en partie seulement le diaphragme qui s'oppose au mélange des liquides. Dans un vase A (*fig.* 67)

Fig. 67.



on dispose un anneau de zinc Z qui ne doit plonger que jusqu'au milieu du vase. Pour cela, il est suspendu par des crochets sur les bords de A, ou bien on le fait reposer sur des

Digitized by Google

saillies *b* du vase poreux B. Ce vase lui-même n'a pas de fond et n'est qu'un simple manchon ouvert aux deux bouts; il s'appuie à la partie inférieure sur un disque D de cuivre auquel est soudé un cylindre de même métal C, percé de trous dans toute sa hauteur, et qui est enveloppé par le manchon poreux.

Pour monter l'appareil, on met au fond du diaphragme une couche de sable S, puis, par-dessus, on remplit le tube C de cristaux de sulfate de cuivre; enfin l'on verse doucement de l'eau acidulée dans le vase extérieur. Une partie de cette eau remonte à travers la couche de sable dans le vase intérieur et s'y charge de sulfate de cuivre.

Une certaine quantité de la dissolution ainsi formée descend au fond du vase A, et y forme une couche bien distincte, grâce à sa couleur, et dont on peut suivre les progrès de manière à l'empêcher d'arriver jamais au zinc. Si elle est trop faible, on ajoute du sulfate en C; si elle vient à augmenter par trop, on ajoute du sable, et, au moyen d'une pipette, on enlève du liquide dans le diaphragme; la dissolution de sulfate remonte alors dans le vase poreux.

Cette pile se rapproche beaucoup des piles sans diaphragme, dont nous parlerons plus loin; elle possède une faible résistance, mais offre l'inconvénient de ne pouvoir être remuée; de plus, la forme particulière du cuivre nécessite une fabrication spéciale.

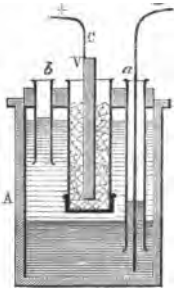
Dans la pile Buff [*Annalen der Chemie und Pharmacie*, t. LXXXV (1853)], le vase A, de terre ou de verre (*fig.* 68), est fermé par un bouchon percé de trois trous. L'un d'eux, au centre du bouchon, est assez grand et laisse passer un manchon de verre V, qu'on ferme à la partie inférieure par une membrane ou par un tampon d'argile. Les deux autres trous sont plus petits et donnent passage à deux tubes de verre ouverts aux deux bouts : l'un, *a*, plonge jusque vers le fond du vase; l'autre, *b*, tout au plus vers la moitié. Quant au manchon fermé par la membrane, il descend environ jusqu'aux trois quarts du vase A.

Le manchon V contient une dissolution saturée de sulfate

Digitized by Google

de cuivre et des cristaux de sulfate en excès; un fil de cuivre C qui y est plongé sert de pôle positif. Par le tube *a* on verse dans le vase A du mercure, dont le niveau doit rester au-dessous du diaphragme de V, tout en en approchant assez. Enfin, par le

Fig. 68.



tube *b*, on remplit peu à peu le vase A d'une dissolution de sulfate de zinc. Dans le tube *a* on dispose, de plus, un fil de zinc qui plonge toujours dans le mercure et sert de pôle négatif; une partie du zinc se dissout dans le mercure et la pile fonctionne comme une pile de Daniell où l'on remplacerait le zinc par de l'amalgame de zinc.

On obtient avec cette disposition des courants très constants et de très longue durée, mais assez faibles comme intensité.

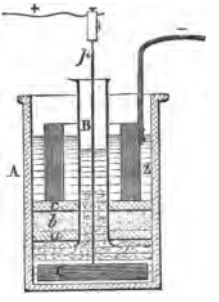
Dans la pile de MM. Siemens et Halske [*Poggendorff's Annalen*, t. CVIII (1859)], le vase extérieur A, de terre ou de verre (*fig.* 69), contient à sa partie inférieure une lame de cuivre C repliée en spirale et portée en son centre par un fil conducteur de cuivre *p*, servant de pôle positif; ce fil est entouré d'un tube de verre B, évasé un peu à sa partie inférieure. Sur cet évasement repose un anneau de papier très épais ou de carton *a*, sur ce carton un diaphragme poreux *b*, et au-dessus un anneau de tissu lâche C. Sur ce dernier anneau se place le cylindre creux de zinc Z, qui n'a pas besoin d'être amalgamé. Autour du zinc on verse simplement de l'eau très légèrement acidulée, et par le tube B on introduit à la partie inférieure du vase A des cristaux de sulfate de cuivre qui donnent avec l'eau qui traverse

Digitized by Google

le diaphragme une dissolution toujours saturée autour de la lame de cuivre C.

L'acide sulfurique mis en liberté par suite de la réduction du

Fig. 69.



sulfate de cuivre passe peu à peu à travers le diaphragme et entretient l'acidité de l'eau qui baigne le zinc.

Tous les quinze jours environ, on retire le liquide qui baigne le zinc, et on le remplace par de l'eau pure. En même temps, on enlève à chaque fois l'anneau de tissu *c*, ce qui permet de retirer de la pile, sans la démonter, toutes les impuretés provenant du zinc. Enfin, quand la pile a fonctionné très longtemps, il faut la démonter pour laver le cuivre et le zinc.

Le diaphragme poreux *b* est simplement formé de pâte de papier que l'on mêle avec le quart de son poids d'acide sulfurique anglais; puis on lave bien la pâte, on la comprime fortement pour chasser l'acide, et on la tasse sur le carton *a* autour du tube B.

Cette pile donne des courants d'une grande constance, ce qui la fait employer pour la télégraphie. Son seul inconvénient est d'être d'un montage assez long et de présenter une grande résistance, variable, du reste, avec l'épaisseur du diaphragme.

C'est probablement cette pile qui a donné l'idée des piles à sable, notamment de la pile Minotto.

L'abbé Fortin [*les Mondes*, t. XVIII; *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVII (1868)] emploie

Digitized by Google

une pile à amalgame de zinc et cuivre, qu'il dispose comme il suit.

Le vase extérieur, en terre, est vernissé dans sa partie inférieure seulement et reste poreux en dessus. La partie qui est ainsi perméable aux liquides doit avoir une hauteur de

$0^m,02$ à $0^m,03$	pour un vase de	$0^m,08$	de diamètre,
$0^m,03$ à $0^m,04$	»	$0^m,12$	»

et ainsi de suite.

Ce vase contient dans toute sa partie vernissée l'amalgame de zinc et, au-dessus, de l'eau acidulée sulfurique. Au centre est le vase poreux, suspendu aux bords du vase extérieur par des oreilles qui le maintiennent à $0^m,03$ au-dessus du fond du grand vase. Ce vase poreux contient une dissolution de sels de cuivre, de plomb ou d'argent, avec une électrode de cuivre, de plomb, de charbon, de platine, etc.

Si l'on se sert de sels de cuivre pour liquide dépolariseur, l'électrode est simplement un fil de cuivre qui se recourbe et va plonger dans l'amalgame de l'élément suivant, où il s'amalgame lui-même à sa surface ; de la sorte, les contacts sont toujours excellents.

Par suite de la porosité de la partie du vase extérieur qui contient l'acide, le sulfate de zinc produit passe à travers ce vase et va former à sa surface extérieure une croûte cristalline que l'on détache de temps en temps. Grâce à ce fait et aussi à la suspension du vase poreux, il ne peut plus, d'après l'auteur, se former de piles locales; de plus, la présence du mercure diminue notablement la résistance intérieure de la pile.

Ces avantages sont loin de compenser l'inconvénient résultant de la grande quantité de mercure que cette pile nécessite, et par suite de son prix élevé. Enfin la formation de croûtes salines à l'extérieur des vases doit être une cause de malpropreté permanente et doit nuire beaucoup à l'isolement des divers éléments. Il ne semble donc pas que cette disposition doive être recommandée.

Du reste, l'idée d'employer l'amalgame de zinc au lieu de

Digitized by Google

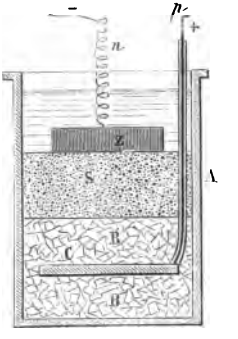
zinc n'est pas nouvelle : Wheatstone a le premier fait une pile avec de l'amalgame de zinc placé dans un vase poreux qui plongeait simplement dans une dissolution de sulfate de cuivre. Cette disposition a l'avantage de permettre d'utiliser tous les morceaux de zinc.

§ II. — Pile a sable.

On a essayé depuis longtemps de simplifier la construction de la pile à deux liquides en supprimant le vase poreux et le remplaçant par une couche de sable interposée entre les deux liqueurs.

La pile de Minotto [*les Mondes*, t. I (1863)] se compose d'un vase de terre A (*fig.* 70) que l'on remplit à moitié de sulfate

Fig. 70.



de cuivre B assez finement pulvérisé; dans ce sulfate est disposé horizontalement un disque de cuivre C, auquel est soudé un fil de cuivre *p* qui remonte hors du vase, et que l'on a eu soin de vernir ou d'enduire de gutta-percha, de manière à l'isoler. Au-dessus du sulfate de cuivre on forme une couche S de sable siliceux pur, inattaquable à l'acide sulfurique, et dont les grains ne doivent pas avoir moins de $0^m,001$ de diamètre. Sur cette couche repose un gros disque de zinc Z, auquel est soudé un fil de cuivre *n*, contourné en spirale de manière à pouvoir s'allonger et permettre au zinc de descendre peu à peu. Quand

Digitized by Google

tout est ainsi disposé dans la pile, il ne reste plus qu'à y verser de l'eau avec précaution, en ayant soin de couvrir tout le zinc et de ne pas déranger la couche de sable. Le zinc descend peu à peu, par son propre poids, à mesure que le sulfate de cuivre se consomme.

Quand la pile a fonctionné très longtemps, il faut, pour la remettre en état, enlever le zinc, le nettoyer avec soin, puis laver le sable à grande eau et en séparer le cuivre qui peut s'y être déposé; il n'y a plus alors qu'à remettre tout en place.

La résistance intérieure de cette pile est plus grande que celle de l'élément Daniell; mais on peut la diminuer en rapprochant le cuivre du zinc, ce que l'on fait en plaçant le disque de cuivre au milieu ou même au-dessus de la couche de sulfate et en diminuant l'épaisseur de la couche de sable. C'est, du reste, surtout de la qualité et de la quantité du sable que dépend la résistance de la pile. Un autre moyen de la diminuer consiste à remplacer le sable par de la grenaille de plomb ou du coke pulvérisé.

La force de la pile Minotto peut atteindre celle de la pile de Daniell. Elle reste constante des mois entiers, et son épuisement est presque subit quand tout le sulfate de cuivre est consommé. Elle offre sur la pile de Daniell ordinaire des avantages marqués : d'abord suppression des diaphragmes, puis diminution de main-d'œuvre, car tout l'entretien se réduit à nettoyer le zinc de temps en temps et à rajouter un peu d'eau pour réparer les pertes par évaporation; encore cette perte peut-elle être évitée si l'on a soin de couvrir la pile. Enfin, la consommation de sulfate de cuivre et de zinc est moins grande que dans la pile de Daniell, ce qui tient surtout à ce que l'action s'arrête d'une manière presque absolue quand le circuit est ouvert.

Cette économie est d'au moins un sixième pour la galvanoplastie et va même jusqu'au tiers quand on emploie la pile pour l'usage de la télégraphie.

La pile Minotto, bien entretenue, est assez constante pour que l'on ait pu s'en servir pour échanger des dépêches simul-

Digitized by Google

tanées en sens contraires par un seul fil, ce qui exige une pile très constante. Aussi l'usage de cette pile s'est-il promptement répandu en Italie, en Allemagne, en Belgique et en Hollande.

Si on la compare à la pile Callaud, dont il sera question plus loin, on voit qu'elles sont à peu près identiques comme prix de revient et d'entretien ; cependant la pile Callaud nécessite un peu moins de nettoyages. La pile Minotto est plus résistante, tout en ayant même force électro-motrice. De plus, la lenteur avec laquelle le sulfate traverse le sable la rend moins propre que la pile Callaud pour les travaux suivis qui s'exécutent sur un circuit peu résistant. Mais la pile Minotto reprend son avantage quand on opère dans un circuit très résistant. De plus, l'usure y est un peu moindre que dans la pile Callaud, et elle ne souffre pas de l'agitation comme cette dernière. Elle lui est encore préférable pour des expériences qui doivent être interrompues fréquemment, car elle est plus facile à remonter, le sable et le cuivre restant en place, tandis que, dans la pile Callaud, chaque démontage occasionne une perte notable de liquides. Enfin, on peut faire varier très facilement la résistance de la pile Minotto en augmentant ou diminuant l'épaisseur du sable, ce qui peut quelquefois être utile, notamment en galvanoplastie.

Calla a perfectionné légèrement la pile Minotto, en remplaçant le disque de zinc par le gros cylindre épais employé dans la pile Callaud. La résistance de la pile n'est pas sensiblement changée, car, si elle doit augmenter par suite de l'éloignement plus grand du zinc et du cuivre, elle doit diminuer en même temps par l'augmentation de surface du zinc, et les deux effets se compensent à peu près.

Le poids du nouveau zinc, plus grand que dans la pile ordinaire, lui permet de durer plus longtemps ; mais l'avantage principal consiste en ce que la forme du zinc nécessite l'emploi d'une plus grande quantité d'eau, qui dissout une plus grande partie du sulfate de zinc formé et l'empêche de se déposer aussi vite à la surface du zinc. Avec cette nouvelle dispo-

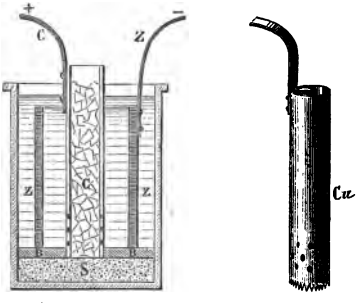
Digitized by Google

sition, le zinc n'a plus besoin d'être nettoyé que tous les deux mois environ.

La pile Minotto a donné dans les mains du P. Secchi un résultat curieux : en examinant la masse compacte de cristaux entremêlés de sulfates de zinc et de cuivre qui se déposent au fond de la pile après un long usage, le P. Secchi a trouvé cette masse traversée par des dendrites de cuivre pur, tout à fait analogues aux dendrites de cuivre que l'on trouve dans les filons. Cette cristallisation naturelle du cuivre peut donc vraisemblablement s'expliquer par des réactions lentes analogues à celles qui se passent dans la pile Minotto.

Jacobini [*les Mondes*, t. II (1863)], inspecteur des télégraphes pontificaux, a emprunté à Minotto l'idée de remplacer le vase poreux par du sable. Sa pile se compose d'un vase de terre ou de verre A (*fig.* 71), au fond duquel on dispose une couche de sable S de $0^m,015$ d'épaisseur; au-dessus on place une rondelle de papier buvard B, percée en son centre d'un trou circulaire de $0^m,04$ de diamètre. Dans ce trou entre un cylindre de cuivre C, de $0^m,04$ de diamètre et de $0^m,13$ de hauteur, ouvert à ses deux extrémités ; il est percé de trous jusqu'à la hauteur de $0^m,05$, et son bord inférieur est dentelé en scie. Avant de le disposer dans le vase, on a soin d'envelopper d'une

Fig. 71.



feuille de papier buvard toute la partie percée de trous. Entre le vase et le cylindre de cuivre, on place sur la rondelle de papier buvard un cylindre de zinc identique à ceux de la pile

Digitized by Google

Daniell ordinaire. Enfin, on remplit le vase de cuivre de sulfate de cuivre pilé et tout le reste du vase de sable inattaquable aux acides. Pour faire fonctionner la pile, il ne reste plus qu'à y verser de l'eau.

L'action s'établit lentement et devient complète au bout de quelques heures; l'intensité du courant croît peu à peu; vers le cinquième ou sixième jour, elle atteint son maximum, puis diminue un peu, pour rester indéfiniment constante si l'on a soin de renouveler le sulfate de cuivre à mesure qu'il s'épuise et d'ajouter de l'eau pour réparer les pertes par évaporation. Quand la pile a fonctionné très longtemps, il faut laver le zinc et le sable et renouveler les papiers buvards.

Cette pile a été employée sur les télégraphes romains et a donné de très bons résultats : elle n'use environ que le quart du sulfate de cuivre de la pile Daniell ordinaire (?); le zinc ne s'altère que peu et seulement par la partie inférieure.

Sa force électro-motrice est sensiblement la même que celle de la pile Daniell ordinaire. De plus, elle est d'une extrême propreté et très facile à entretenir, grâce à la forme du cuivre, qui permet d'ajouter du sulfate sans démonter la pile. Enfin, le cuivre qui se dépose est plus facile à enlever que dans la pile Minotto, et il ne se forme jamais au fond cet amas de cristaux que nous avons signalé dans la pile Minotto.

L'inconvénient est que les trous du vase de cuivre finissent par être obstrués par les dépôts de cuivre. On peut y obvier en mettant le cuivre au milieu même du sulfate; mais il y aurait alors mélange de sulfate et de sable. Pour éviter ces deux inconvénients, le P. Secchi supprime les trous et les dentelures du vase de cuivre, et il le ferme simplement par un sac en vessie, que l'on remplit de cristaux de sulfate de cuivre. Plusieurs de ces piles ainsi modifiées ont fonctionné pendant dix mois et demi sans qu'on ait eu besoin d'y toucher. La pile marche encore mieux quand on remplace le sable par du soufre pulvérisé. Cette pile est, en somme, inférieure à la pile Minotto, qui est plus puissante et dont les diverses parties ont une forme plus simple.

Digitized by Google

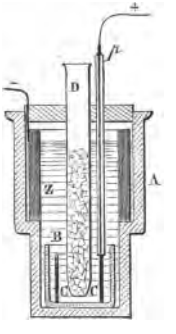
L'avantage de ces piles est surtout dans le sable, qui rend immobiles les liquides. Aussi le P. Secchi a-t-il obtenu de très bons résultats en mettant simplement du sable autour du zinc des piles Daniell ordinaires. Le courant met plus de temps à s'établir, mais se conserve plus longtemps et plus constant; enfin le dépôt de cuivre ne vient plus incruster les diaphragmes.

§ III. — Piles sans diaphragme.

La suppression totale du diaphragme dans l'élément à deux liquides est un progrès réel : on diminue par là la résistance de l'élément. Mais ce genre de pile ne convient pas dans le cas où il est nécessaire de déplacer fréquemment l'appareil : il n'est pas transportable.

Meidinger [*Poggendorff's Annalen*, t. CVIII (1859)] emploie un vase de verre A (*fig.* 72), qui, primitivement, présentait à

Fig. 72.



sa partie inférieure un rétrécissement que l'on supprime maintenant pour employer les bocaux de piles ordinaires. Au rebord de ce vase est suspendu par des crochets un anneau de zinc Z, qui ne plonge que jusque vers la moitié de A.

Au fond de ce grand vase en est un second petit B, contenant une lame de cuivre C enroulée en cylindre et soudée à un fil de cuivre *p*, qui se rend à l'extérieur et sert de pôle positif. On

Digitized by Google

isole ce fil, soit par une enveloppe de gutta-percha, soit en le soudant dans l'intérieur d'un tube de verre. Le grand vase est fermé à peu près, mais non hermétiquement, par un bouchon traversé par un tube de verre D qui plonge au fond du petit vase.

Pour faire fonctionner cet appareil, on commence par mettre en B des cristaux de sulfate de cuivre, puis on remplit tout l'appareil d'une dissolution de sulfate de magnésie. Le sulfate de cuivre se dissout peu à peu dans le sulfate de magnésie, mais reste au fond du vase à cause de la plus grande densité de sa dissolution. De la sorte, le zinc est à peu près complètement préservé de dépôts cuivreux. Enfin, par le tube D, on introduit dans le petit vase des cristaux de sulfate de cuivre au fur et à mesure des besoins, sans qu'il soit nécessaire de rien démonter. On peut remplacer le bouchon et le tube D par un ballon renversé, comme nous l'avons indiqué plus haut (p. 173).

L'acide sulfurique étendu serait moins avantageux que le sulfate de magnésie, car il faciliterait davantage la diffusion des sels de cuivre; il en serait de même de l'eau pure. Enfin il faut préférer le sulfate de magnésie à celui de potasse, car ce dernier formerait sur le zinc des dépôts de sels doubles de potasse et de zinc difficilement solubles, tandis que le sel correspondant de magnésie se dissout très facilement.

La force électro-motrice de cet élément ne diffère pas beaucoup de celle de la pile Daniell, mais la résistance y est beaucoup moindre, grâce à la suppression complète du diaphragme. Un inconvénient de cette pile est évidemment l'impossibilité de la déplacer sans la démonter; mais cet inconvénient est nul en télégraphie, service pour lequel cette pile a été imaginée.

Krüger [*Dingler Journal*, t. CLXXXI] a proposé de modifier l'élément Meidinger de la manière suivante. Le vase de verre ou de terre contient toujours un anneau de zinc reposant par des oreilles sur les bords du vase; mais, au centre, on place un cylindre creux de cuivre de même hauteur que le vase extérieur et que l'on remplit de cristaux de sulfate de

Digitized by Google

cuivre. Ce cylindre porte à sa partie inférieure deux fentes, qui permettent à la dissolution de sulfate de cuivre de passer à l'extérieur.

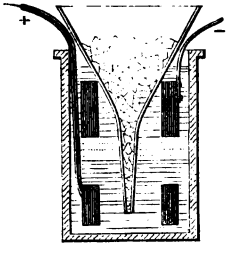
Le vase extérieur est toujours rempli par la dissolution de sulfate de magnésie.

Grâce à cette disposition, la dissolution du sulfate de cuivre se fait lentement et reste au fond du grand vase sans atteindre le zinc, ce qui arrivait quelquefois dans la pile Meidinger. Enfin, la pile ainsi modifiée a une résistance encore moindre que l'élément primitif Meidinger. Toutefois le contact du cylindre de cuivre avec la dissolution de sulfate de zinc amène une certaine diminution de la force électro-motrice.

La pile Krüger donne un courant très constant, et est employée dans un certain nombre de bureaux télégraphiques allemands. Dans une batterie de 50 couples, après deux mois d'action, cet élément n'avait perdu que 4 pour 100 de sa force électro-motrice. Enfin le seul entretien qu'il exige est de le remplir à nouveau de sulfate de magnésie quand la première dissolution contient par trop de sulfate de zinc.

La pile de Callaud [*Cosmos*, t. XIX (1861), t. XX (1862)], très employée dans les lignes télégraphiques françaises, est analogue, dans ses traits généraux, à la pile Meidinger. Au fond

Fig. 73.



du vase de verre (*fig.* 73), est une lame de cuivre, enroulée en spirale sur elle-même ou simplement en cylindre, et à laquelle est soudé un gros fil de cuivre recouvert de gutta-percha et qui remonte hors du vase pour servir de pôle positif. Au-dessus, le

Digitized by Google

cylindre de zinc se trouve suspendu par trois crochets sur les bords du vase. Dans le fond, on verse une dissolution saturée de sulfate de cuivre jusqu'à une faible distance au-dessous du zinc, et l'on achève de remplir avec de l'eau pure ou une dissolution saturée de sulfate de zinc étendue d'un égal volume d'eau pure. On peut aussi recouvrir le tout d'un entonnoir rempli de cristaux de sulfate de cuivre et dont la pointe plonge dans la dissolution de sulfate, qui est ainsi toujours maintenue à l'état de saturation. Cette dernière disposition est surtout employée dans les stations où la pile doit être longtemps abandonnée à elle-même sans être visitée; mais, quand on peut l'examiner de temps en temps, il vaut mieux ne pas mettre de sulfate de cuivre en excès. La saturation de la dissolution de sulfate de cuivre favorise, en effet, la formation de dépôts cuivreux sur le zinc, et par suite de courants secondaires qui usent inutilement une quantité notable de zinc.

Quand il se forme au-dessous du zinc des dépôts métalliques en grappes, il est bon de les faire tomber au fond du vase avant qu'ils atteignent la couche de séparation des deux liquides ; ces dépôts une fois au fond du vase ne paraissent pas troubler le bon fonctionnement de la pile.

Elle est très économique, et le cuivre qui provient de la réduction du sel se retrouve pur. Le seul inconvénient de cette pile, inconvénient qui disparaît pour l'usage des stations télégraphiques, est qu'elle ne peut être déplacée sans crainte de mêler les liquides et d'occasionner des dépôts de cuivre sur le zinc.

La pile Callaud est très employée sur les lignes télégraphiques en France, aux États-Unis et dans plusieurs autres contrées.

Les dimensions adoptées sont les suivantes :

Vase de verre de $0^{m},20$ de hauteur et de $0^{m},13$ de diamètre, ayant environ 3^{lit} de capacité;

Lame de cuivre de 1^{dmq} de surface et de $0^{m},03$ de hauteur, à laquelle est soudé un fil de cuivre recouvert de gutta-percha;

Lame de zinc amalgamé formant un cylindre de $0^{m},05$ de

Digitized by Google

rayon et $0^m,07$ de hauteur. On ferme quelquefois l'élément par deux lames de verre pour empêcher l'évaporation.

Le zinc doit être nettoyé tous les trois mois; on ajoute en même temps 200^{gr} à 300^{gr} de sulfate de cuivre et l'on retire un peu de la solution de sulfate de zinc que l'on remplace par de l'eau pure; cette dernière opération a pour but d'éviter l'augmentation de la résistance qui se produirait si le sulfate de zinc arrivait à saturation.

Quand on monte la pile Callaud, il est bon, après avoir mis en place les deux métaux, de verser d'abord dans le vase l'eau pure ou la dissolution étendue de sulfate de zinc. On ajoute ensuite la dissolution de sulfate de cuivre au moyen d'un siphon qui plonge jusqu'au fond du vase; cette dernière dissolution reste en bas, à cause de sa plus grande densité, et les liquides sont ainsi moins mélangés que si l'on avait simplement versé l'eau sur le sulfate de cuivre.

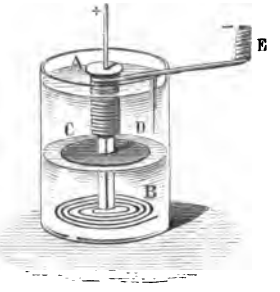
Grâce à la suppression du vase poreux, la pile Callaud est nécessairement moins résistante que la pile Daniell ordinaire; de plus, l'absence du diaphragme ne paraît pas augmenter sensiblement les actions locales. Les deux liquides superposés sont aussi bien séparés l'un de l'autre par leur densité qu'ils le sont dans les piles ordinaires, alors qu'ils sont de part et d'autre d'une cloison poreuse verticale. Toutes les fois que les services qu'on attend de la pile n'obligent pas de la déplacer, il y aura donc tout avantage à préférer la forme Callaud au type ordinaire à vase poreux.

M. Trouvé a imaginé une disposition très simple (*fig.* 74) de la pile Callaud. Un fil de cuivre est enroulé en spirale plate au fond du vase, et une de ses extrémités s'élève dans l'axe d'un tube de verre AB pour former le pôle positif. Un fil de zinc s'enroule autour de la moitié supérieure de ce tube, et son extrémité libre est le pôle négatif. Un disque de liège CD est placé entre les deux spirales et dans le plan de séparation des liquides, dont il rend ainsi le mélange plus difficile. On remarquera que le bout libre du fil de zinc est aussi enroulé en E sous forme spirale. On entre dans cette spirale le bout libre du cuivre de

Digitized by Google

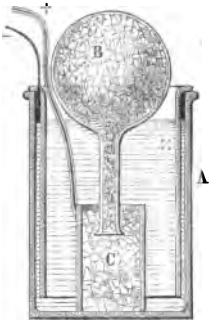
l'élément suivant pour les assembler : c'est un mode de réunion très commode et très expéditif.

Fig. 74.



La pile Vérité [*les Mondes*, t. I (1863)] se compose d'un vase cylindrique A, de verre ou de grès (*fig.* 75), dans lequel se place un autre vase cylindrique de cuivre mince C, de hauteur et de diamètre moitié moindres, et auquel est soudé un fil de cuivre qui permet de le mettre en communication avec l'extérieur.

Fig. 75.



Autour de ce vase de cuivre on met un cylindre de zinc Z, suspendu par des crochets aux rebords du vase A, ce qui l'empêche de toucher le fond et d'entrer ainsi en communication avec le cuivre au moyen des boues conductrices qui peuvent se déposer au fond du vase pendant le fonctionnement de la pile. Dans le vase C on dispose des cristaux de sulfate de cuivre et on remplit tout le système d'eau pure, après avoir eu soin de

Digitized by Google

mettre dans le fond du vase A quelques cristaux de sulfate de zinc pour rendre l'eau conductrice. On renouvelle de temps en temps l'eau du vase et les cristaux de sel de cuivre.

On peut éviter cet entretien en fermant tout le vase par un ballon de verre B rempli de cristaux de sulfate de cuivre et dont le col va plonger dans le vase C. De la sorte, l'évaporation de l'eau est à peu près nulle et la quantité de sulfate de cuivre est assez considérable pour permettre à la pile de fonctionner des mois entiers.

Le courant de cette pile est bien constant et, comme pour la pile Callaud, sa résistance est moins grande que celle de la pile Daniell ordinaire. On l'a essayée avec assez de succès, pour l'usage de la télégraphie, sur le chemin de fer du Nord. Avec 40 couples on correspondait parfaitement de Paris avec Calais. Son inventeur, M. Vérité, l'emploie pour faire fonctionner ses horloges électriques.

La pile Normann, employée dans les bureaux télégraphiques de l'Italie méridionale, est identique à la pile Callaud, sauf les points suivants : 1° le cuivre est remplacé par des lames de plomb sur lesquelles se forme, du reste, dès les premiers instants, un dépôt galvanique de cuivre; 2° le vase de verre est conique et va en se rétrécissant vers le bas, de sorte que le zinc, plus large que le fond du vase, est retenu naturellement à une certaine hauteur sans qu'il soit nécessaire d'employer des crochets.

§ IV. — Modifications diverses.

Remak [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LV (1862)], professeur de Médecine à l'Université de Berlin, donne à la pile Daniell une nouvelle forme, dans le but de la rendre portative et applicable aux usages médicaux. Il prend de petites assiettes de 3 à 4 pouces de diamètre, en zinc et en cuivre, superposées et séparées par des assiettes d'argile et par deux rondelles de laine, mouillées l'une d'acide sulfurique étendu du côté du zinc, et l'autre d'une solution de

Digitized by Google

sulfate de cuivre du côté du cuivre. La même disposition peut être appliquée aux piles de Bunsen et de Grove. C'est celle qu'avait adoptée Marié-Davy pour sa pile à sels de plomb (*voir* p. 135).

Boulay [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. LXVI (1868); *les Mondes,* t. XIX] propose d'apporter à l'élément Daniell les modifications suivantes : le cuivre est intérieur et plonge dans une liqueur formée de volumes égaux de sulfate de cuivre et d'azotate de potasse. Le zinc plonge dans une dissolution de sel marin contenant 30 pour 100 de son poids de fleur de soufre. Cette dernière substance a pour but, dans le cas où du cuivre traverserait le vase poreux, de former avec lui du sulfure de cuivre insoluble, et de l'empêcher ainsi de se déposer sur le zinc, où il donnerait naissance à une pile locale. Quant à l'azotate de potasse, il empêcherait les champignons métalliques qui se forment généralement sur le cuivre.

La résistance de l'élément ainsi modifié est moindre que celle de l'élément Daniell. Sa force électro-motrice est sensiblement égale à celle de la pile au sulfate de mercure. Sa constance est très grande : ainsi elle a pu fonctionner six mois sans presque rien perdre.

La pile du Dr Plush [*la Lumière électrique,* p. 178 (1880)] ne diffère de la pile Callaud que par la disposition du zinc. A mi-hauteur du bocal en verre et à une certaine distance au-dessus du cylindre de cuivre est une plaque de cuivre horizontale, percée de trous et accrochée aux bords du vase par trois tiges de cuivre, dont une sert de pôle négatif. Sur cette plaque de cuivre on place le zinc, que l'on peut employer sous une forme quelconque, en morceaux par exemple. L'inconvénient de cette disposition est de donner un courant local intense entre les morceaux de zinc et la plaque de cuivre qui les porte; ce courant augmente inutilement la consommation du zinc; d'autre part, l'avantage est qu'on peut utiliser immédiatement, de la sorte, tous les débris de zinc. que l'on serait, sans cela, obligé de refondre.

Digitized by Google

James Moser [*la Lumière électrique*, p. 139 (1880)] a imaginé de suspendre au-dessous du cylindre de zinc, dans la pile Callaud ou dans la pile Meidinger, une bande de zinc de quelques centimètres de longueur. Le sulfate de cuivre dissous qui se diffuse dans le sulfate de zinc se trouve alors arrêté par la lame accessoire et ne va plus autant se porter sur le cylindre de zinc, qui ne communique pas avec cette lame. On diminue ainsi notablement les dépôts de cuivre sur le zinc et les actions locales qui en sont la conséquence.

M. Delaurier a essayé de remplacer les substances usitées dans la pile de Daniell par d'autres, en vue d'obtenir une plus grande constance. Nous empruntons quelques résultats au Mémoire qu'il a publié sur ce sujet [*les Mondes*, t. XXII (1870)] :

1° Vase extérieur en verre, grès ou porcelaine, contenant un cylindre de cuivre et une solution de 40 parties d'eau, 15 de sulfate de cuivre, 6 d'acide sulfurique, en poids. On recouvre de cire le bord du vase pour empêcher les sels de grimper. Vase poreux contenant de l'eau salée et un cylindre de zinc non amalgamé.

2° Vase extérieur en verre, etc., contenant une solution de 40 parties d'eau, 25 de sulfate de peroxyde de fer, 6 d'acide sulfurique et un cylindre de charbon ou de cuivre doré. Vase poreux contenant de l'eau salée et un cylindre de fer.

3° Vase extérieur en cuivre ou étain, contenant un mélange de 10 parties d'eau, 29 d'acétate de plomb, 7 de sel marin, chlorure de calcium ou acétate de potasse. Vase poreux contenant du zinc et de l'eau salée.

Dans la pile de Weare, le cuivre est plongé dans une dissolution de chlorure de cuivre et le zinc dans une dissolution de chlorure de calcium. Le chlorure de zinc se forme, et le courant qui résulte de cette action chimique décompose le chlorure de cuivre; le métal se dépose sur la lame de cuivre de l'élément, et le chlorure, traversant la cloison poreuse, va réparer les pertes du chlorure de calcium. Finalement, on a du chlorure de zinc, qui est utilisable dans l'industrie.

L'auteur de ce système a adopté la forme de la pile à auge,

Digitized by Google

avec des cloisons poreuses formées de feuilles minces de sapin recouvertes de papier.

Eisenlohr [*Poggendorff's Annalen*, t. LXXVIII (1849); *Archives de Genève*, t. XIII] emploie pour les télégraphes la pile Daniell, en remplaçant l'eau acidulée sulfurique par une dissolution de tartre (bitartrate de potasse). Des résultats numériques insérés dans les *Annales de Poggendorff* sembleraient prouver la remarquable constance de cette nouvelle pile.

E. Wartmann propose encore de faire plonger le zinc dans de l'eau acidulée sulfurique et le cuivre dans la solution de bitartrate. Une pile montée de cette façon aurait fonctionné sans interruption pendant trois semaines, avec une constance merveilleuse.

La pile de Ney [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVII; *les Mondes*, t. XIX (1868)] se compose d'un vase rempli d'une solution de sel ammoniac dans laquelle se trouve une lame de zinc amalgamé, et d'un cylindre de terre poreuse rempli de carbonate de cuivre, dans lequel plonge une lame de cuivre. Pour l'entretien de la pile, il suffit d'ajouter de temps à autre des cristaux de sel ammoniac.

Dans la télégraphie militaire en campagne, où la pile doit se prêter facilement au transport, on pourrait employer pour remplir le vase, au lieu d'une dissolution de sel ammoniac, du sable saturé de cette même solution.

Cet élément se recommande par son prix réduit, car le carbonate de cuivre naturel (carbonate de Chessy) suffit parfaitement; de plus, il n'exige d'alimentation qu'au moment où il fonctionne.

Le carbonate de cuivre par lui-même est insoluble dans le sel ammoniac; mais, quand le circuit est fermé, il se produit une réduction partielle du sel : l'acide chlorhydrique se porte sur le zinc, et l'ammoniaque rendue libre dissout le carbonate de cuivre. Cette dissolution est réduite à son tour par l'hydrogène, comme le sulfate de cuivre dans l'élément Daniell.

La force électro-motrice de cet élément serait égale à celle

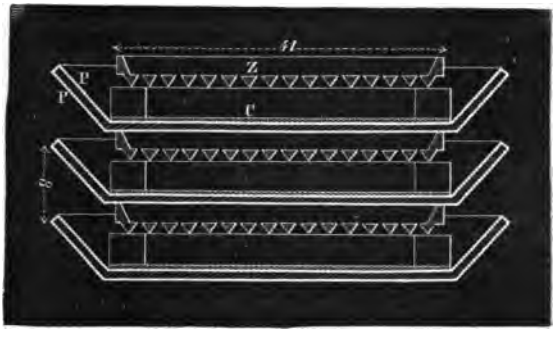
Digitized by Google

de l'élément Daniell, et, d'après l'auteur, il serait au moins aussi constant.

Une des modifications les plus intéressantes que l'on ait fait subir à la pile Daniell est celle qui a été imaginée par sir William Thomson. Les éléments sont disposés verticalement les uns sur les autres comme dans la pile à colonne, de sorte qu'une pile de 10 couples n'occupe pas sur le sol plus de place qu'un seul élément.

Un élément (*fig.* 76) (¹) se compose d'une boîte carrée en

Fig. 76.



bois, évasée par le haut et doublée intérieurement de cuivre, ou plus économiquement de plomb. Dans cette boîte on verse une dissolution de sulfate de cuivre, et on place sur le fond quatre cales en bois; sur ces cales repose l'électrode zinc; celle-ci a la forme, non d'une lame pleine, mais d'un gril renversé, dont les barreaux sont assez écartés pour laisser les mouvements du liquide s'effectuer facilement. On obtient cette électrode en coulant le zinc fondu dans un moule convenable.

En général, le zinc, en forme de gril, est enveloppé par le bas et sur les quatre côtés dans une feuille de papier parchemin, dans laquelle on verse l'eau pure ou la dissolution de sulfate de zinc. On pourrait se dispenser de ce diaphragme en

(¹) Nous devons cette figure à l'obligeance de M. Niaudet-Bréguet, qui a le premier construit en France la pile Thomson.

Digitized by Google

ne versant le sulfate de cuivre que jusqu'à la hauteur du milieu des cales en bois et en ajoutant en dessus, comme dans la pile Callaud, la dissolution étendue de sulfate de zinc.

Pour monter plusieurs éléments en série, on a soin que la garniture de cuivre ou de plomb qui recouvre intérieurement la boîte de bois déborde et soit repliée à l'extérieur, de façon qu'elle pose directement sur les côtés de la lame de zinc en forme de gril, quand on met un deuxième élément sur le premier. La communication se fait donc, comme dans la pile à colonne, par la superposition directe du zinc d'un élément et du cuivre de l'élément supérieur.

Le principal avantage de cette pile est que sa résistance est extrêmement faible, à cause de la grandeur des surfaces en présence et de leur rapprochement; par suite, elle donne en court circuit une intensité considérable et comparable à celle qu'on obtiendrait avec un élément Bunsen ordinaire. Elle est employée principalement dans la télégraphie sous-marine, pour faire fonctionner le récepteur écrivant connu sous le nom de *siphon recorder*, et qui est dû également à sir William Thomson. La résistance de cette pile est assez faible pour qu'on ait pu l'essayer également à faire de la lumière électrique, et avec elle la dépense d'entretien a été notablement plus faible, pour une même quantité de lumière, qu'avec toute autre pile; mais le prix d'achat de la pile Thomson est très élevé; de plus, elle est encombrante et d'un montage pénible.

Pour que cette pile fonctionne bien, il est nécessaire d'enlever de temps en temps une partie du liquide qui baigne le zinc et de le remplacer par de l'eau pure, pour que la densité du liquide supérieur soit toujours beaucoup plus faible que celle du sulfate de cuivre. De plus, quand on interrompt les expériences, il ne faut jamais laisser trop longtemps le circuit ouvert; on doit le fermer par une bobine extérieure assez résistante.

Si on laissait le sulfate de zinc arriver à saturation, il deviendrait plus dense que la dissolution de sulfate de cuivre et

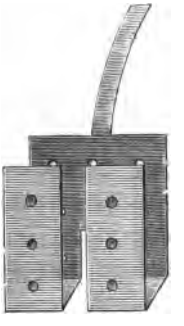
Digitized by Google

tomberait au fond du vase. On peut donc, comme l'a fait également du reste sir William Thomson, renverser la pile et mettre à la partie inférieure le zinc et le sulfate de zinc en dissolution, saturée cette fois, et en dessus le cuivre et le sulfate de cuivre. Cette disposition paraît toutefois moins avantageuse que la première, au moins pour les usages ordinaires; en effet, une partie du cuivre qui se dépose par électrolyse peut tomber sur le zinc et forme alors avec lui des couples locaux qui augmentent inutilement la consommation.

M. E. Reynier vient d'imaginer [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XC (1880)] une modification de la pile Daniell qui paraît appelée à de nombreuses applications. Le zinc de cette pile plonge dans une dissolution de soude caustique; l'électrode négative, qui est en cuivre, est dépolarisée par une dissolution de sulfate de cuivre; pour augmenter la conductibilité des deux liquides, on les additionne de sels convenablement choisis et qui n'interviennent pas dans les réactions chimiques de la pile.

La nouvelle pile est contenue dans des bocaux de verre rectangulaires de $0^m,20$ de hauteur; cette forme permet, comme nous l'avons vu déjà, de rapprocher beaucoup les deux élec-

Fig. 77.

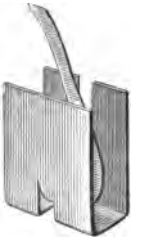


trodes et d'augmenter leur surface utile, et par suite d'obtenir une très faible résistance. Dans le premier bocal on met la dissolution de sulfate de cuivre et la lame de cuivre, dont la

Digitized by Google

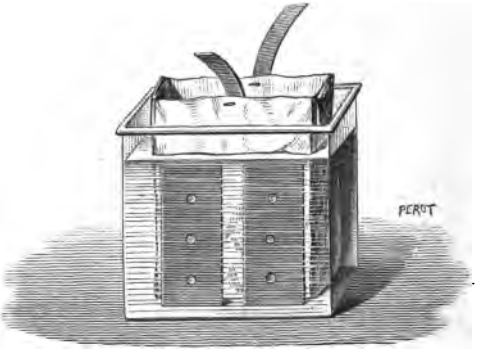
forme est représentée dans la *fig.* 77; cette lame est découpée sans perte dans une feuille de cuivre laminé du commerce, et la queue est relevée dans le morceau même, ce qui dispense de faire une soudure et donne au milieu de la lame une large ouverture qui facilite la circulation des liquides. Dans l'intérieur

Fig. 78.



de la lame de cuivre repliée est le vase poreux, sur lequel nous allons revenir; ce vase contient la dissolution de soude caustique et la lame de zinc (*fig.* 78), découpée dans une feuille laminée comme le cuivre, et avec queue relevée dans la lame même. La *fig.* 79 représente l'élément monté.

Fig. 79.



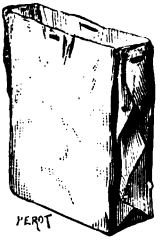
Le vase poreux mérite une description spéciale. Comme la soude caustique dissout la plupart des substances qui composent d'ordinaire les vases poreux, M. E. Reynier a adopté des vases en papier parcheminé. Ces vases sont très faciles à

Digitized by Google

construire d'un seul morceau, sans collage ni couture, de la manière suivante. Au milieu de la feuille de papier parcheminé devant servir à la construction du vase, on trace la base du prisme. A une distance de chacun de ses côtés égale à la hauteur du vase, on mène des parallèles qui dessinent un polygone semblable au premier et que l'on découpe. Ensuite on forme le vase en plissant les portions du papier placées en dehors du développement géométrique du prisme. Ces plis sont ensuite appliqués et agrafés sur celles des faces du vase qui doivent être peu ou point perméables, les petites faces dans le cas d'un vase rectangulaire.

La *fig.* 80 représente en perspective le vase poreux rectan-

Fig. 80.



gulaire; la *fig.* 81 montre développée la feuille de papier qui a servi à le constituer; les plis creux sont indiqués par des traits forts et les plis saillants par des traits faibles. Le même mode de construction est applicable à d'autres formes de vase; on peut faire, par exemple, des vases à base d'octogone régulier qui remplacent les vases poreux cylindriques.

Les vases constitués avec une seule épaisseur de papier donnent une pile dont la résistance est extraordinairement faible; mais ils ne sont pas assez solides et n'offrent pas, dans des expériences de longue durée, un obstacle suffisant au mélange des liquides. On emploie alors des vases construits comme il a été dit précédemment, mais avec deux et même trois épaisseurs de papier.

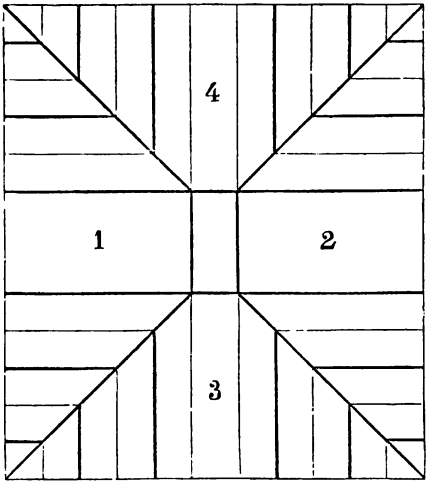
Comme la soude n'exerce aucune action sur le zinc tant que le circuit reste ouvert, on peut employer du zinc ordi-

Digitized by Google

naire non amalgamé; de plus, la dépense de zinc est absolument nulle quand la pile ne fonctionne pas et, pendant les expériences, reste exactement proportionnelle à l'intensité du courant qui prend naissance.

La force électro-motrice de cette pile est de $1^{volt},35$, c'est-à-dire presque exactement intermédiaire entre celles des piles Daniell et Bunsen; sa résistance est extrêmement faible et à

Fig. 81.



peine supérieure à celle des éléments Bunsen plats de mêmes dimensions. En effet, les éléments de $0^{m},20$ de hauteur ont sensiblement pour résistance

Bunsen plat.....	$0^{ohm},060$
Reynier.....	$0^{ohm},075$

Cette pile est d'une remarquable constance; dans des expériences répétées en public devant la Société de Physique, on l'a éprouvée en faisant passer le courant seulement dans un fil de platine de $0^{m},60$ de longueur, qui était porté à l'incandescence. L'expérience a été prolongée plus d'une heure sans que la force de la pile ait diminué d'une manière appréciable,

Digitized by Google

ce qui est extrêmement remarquable, à cause de la faible résistance du circuit extérieur, et par suite de l'intensité du courant qui le traversait.

Comme la nouvelle pile n'émet pas de produits volatils, elle contient, après fonctionnement, toutes les substances employées, autrement combinées, mais sans perte aucune. Il est donc possible de régénérer ces produits, c'est-à-dire de ramener à peu près la pile à l'état neuf : il suffit, pour cela, de faire traverser la pile épuisée et en sens inverse par une quantité d'électricité légèrement supérieure à celle qui a été dégagée; on dissout ainsi le cuivre déposé et on dépose sur la lame de zinc le zinc qui a été dissous. On conçoit que l'on puisse demander l'électricité nécessaire à cette revivification à des machines électro-magnétiques, qui produisent l'électricité à beaucoup meilleur marché que les piles, de sorte que l'élément Reynier pourra peut-être un jour donner le moyen de transporter, pour ainsi dire, l'électricité engendrée par les machines.

Quoi qu'il en soit de cette dernière conception, cette pile n'en reste pas moins une des plus énergiques que l'on connaisse, tout en possédant une grande constance.

Digitized by Google

CHAPITRE QUATRIÈME.

SECONDE CLASSE. — PILES A DEUX LIQUIDES.

SECONDE SECTION. — PILES DE COMPOSITION CHIMIQUE VARIABLE.

§ I. — Type de Grove :
ZINC, PLATINE; LIQUIDE DÉPOLARISANT, ACIDE AZOTIQUE.

La pile de Grove [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. VIII (1839); *Philosophical Magazine*, t. XIII (1838)] est une pile à deux liquides, où le liquide dépolarisant est de l'acide azotique.

La première forme qui lui ait été donnée est la suivante. Grove mastiquait dans un petit verre le fourneau d'une pipe de terre; dans la pipe il versait de l'acide nitrique pur, et dans le verre de l'acide chlorhydrique au même niveau que l'acide nitrique. Dans l'acide chlorhydrique plongeaient deux feuilles d'or qui restaient inattaquées. Mais, quand on venait à attacher l'une des feuilles à un fil d'or ou de platine dont l'autre extrémité plongeait dans l'acide nitrique, cette feuille se dissolvait rapidement, tandis que l'autre feuille isolée restait intacte.

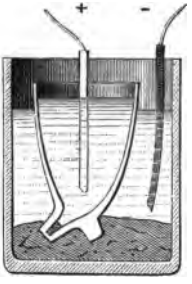
Bientôt Grove remplaça la feuille d'or par une lame de zinc et l'acide chlorhydrique soit par une dissolution de potasse caustique quand on employait du zinc ordinaire, soit par de l'acide sulfurique étendu de cinq à six fois son volume d'eau quand on employait du zinc amalgamé.

Il obtint de la sorte une pile (*fig.* 82) douée d'une grande force électro-motrice et dont le courant était sensiblement constant, au moins pendant les premiers temps.

Digitized by Google

Une pile en couronne de $0^m,108$ de diamètre et de $0^m,034$ de hauteur, consistant en sept petits verres et sept têtes de pipe, et présentant une surface métallique totale de 29^{dmq}, décom-

Fig. 82.



posait l'eau très fortement et donnait en deux minutes 19^{cc} de gaz tonnant.

Telle est la forme première de la pile de Grove; on s'en sert encore quelquefois avec avantage quand on veut avoir une pile énergique sous un petit volume.

Pour les grands éléments, on emploie la disposition suivante.

Dans un vase cylindrique de terre ou de verre, on place une lame de zinc amalgamé repliée en forme de cylindre, et l'on y verse de l'eau acidulée avec un centième environ de son volume d'acide sulfurique. Au centre se place un vase cylindrique en terre poreuse, contenant de l'acide azotique ordinaire du commerce, dans lequel plonge une lame de platine. Aux lames de zinc et de platine sont fixées deux pinces de cuivre, où viennent s'engager les extrémités des rhéophores.

Aussitôt que l'on ferme le circuit, le zinc amalgamé, en présence de l'acide sulfurique, décompose l'eau en donnant du sulfate de zinc. L'hydrogène de l'eau, mis en liberté, se porte vers le pôle positif, traverse la cloison poreuse, et, rencontrant l'acide azotique, le réduit en donnant de l'eau et des vapeurs nitreuses qui se dégagent, tandis que du bioxyde d'azote et de l'acide hypoazotique se dissolvent dans l'acide azotique.

Pour augmenter la surface du platine, Grüel a proposé de remplacer la feuille unique de platine par deux feuilles en

Digitized by Google

croix, et Poggendorff [*Poggendorff's Annalen*, t. LI (1840)] a conseillé de la replier en forme d'S (*fig.* 83), en la fixant à un couvercle de porcelaine au moyen d'une soudure au soufre,

Fig. 83.

qui ne s'attaque pas par l'acide azotique. Ce couvercle de porcelaine ferme le vase poreux, de manière à diminuer un peu le dégagement des vapeurs nitreuses.

Pour s'opposer au mélange des liquides, Morse plaçait dans le vase de terre un premier vase poreux plein d'acide sulfurique concentré, dans lequel on mettait ensuite le vase poreux à acide azotique [Morse, *Archives de l'électricité*, t. III (1843)]; mais cette disposition est fort incommode et, de plus, augmente énormément la résistance intérieure de la pile, ce qui l'a fait rejeter.

Depuis quelque temps, pour avoir le maximum d'effet avec la pile de Grove, on remplace les vases cylindriques par des vases dont la section est un rectangle assez allongé, de manière à rapprocher autant que possible les différentes parties les unes des autres; on diminue beaucoup ainsi la longueur de la colonne liquide que le courant doit traverser dans la pile; sa résistance intérieure devient alors plus faible, et l'intensité du courant produit se trouve notablement augmentée. Dans cette nouvelle disposition, le zinc est formé par une lame recourbée deux fois à angle droit, comme le représente la *fig.* 84 [*Archives de l'électricité*, t. III (1843)].

La pile de Grove est la plus puissante que l'on connaisse. Sa force électro-motrice est $1^{volt},96$, soit environ 1,8 de celle de la pile de Daniell, tandis que sa résistance intérieure est

Digitized by Google

moitié moindre. De plus, elle nécessite un beaucoup moins grand volume de liquide dépolarisant, car la dissolution saturée

Fig. 84.

de sulfate de cuivre ne peut fixer que $\frac{154}{1500}$ ou environ $\frac{1}{10}$ de l'hydrogène que fixe un volume égal d'acide azotique.

D'un autre côté, elle offre plusieurs inconvénients. D'abord, le dégagement de vapeurs nitreuses peut devenir fort incommodant et même dangereux ; il oblige à monter la pile en plein air ou dans un local aéré d'une manière toute spéciale.

Puis sa constance est beaucoup moins grande que celle de la pile de Daniell, car l'acide azotique se détruit à mesure que le courant passe, sans être renouvelé, ce qui change d'une manière continue la résistance et l'efficacité du liquide dépolarisant. Enfin elle revient à un prix élevé, à cause de la lame de platine qu'on y emploie. C'est cette dernière raison qui lui fait préférer maintenant la pile de Bunsen lorsqu'on a besoin d'un courant énergique.

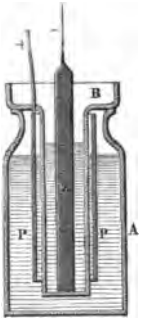
Quelques modifications de détail ont été apportées dans la forme de la pile de Grove, pour en rendre l'usage moins gênant dans les laboratoires. Au premier rang, on peut citer celle de de la Rive (*fig.* 85). Cette pile se compose d'un grand flacon de verre A bouché à l'émeri, pouvant contenir environ 1^{lit} d'acide azotique, et dont le col a $0^{m},10$ d'ouverture. Dans ce col passe un cylindre de terre poreuse B, muni à sa partie supérieure d'une dilatation qui lui permet de s'appuyer sur les bords du vase, qui se trouve ainsi complètement fermé. Dans le cylindre, on verse de l'eau acidulée et l'on suspend un bâton de zinc amalgamé. La feuille de platine est enroulée autour du

Digitized by Google

cylindre poreux et très près de sa surface; elle lui est fixée et communique avec l'extérieur au moyen d'un fil de platine qui traverse le renflement.

Toutes les pièces se tenant entre elles, le montage et le dé-

Fig. 85.



montage de cette pile sont très rapides. Le flacon est toujours fermé, et, par suite, le dégagement de vapeurs nitreuses est assez faible. Enfin, comme la quantité d'acide azotique que contient le flacon est très grande, on a moins souvent besoin de le renouveler, et l'altération en est moins rapide, ce qui augmente un peu la constance de la pile.

Les seuls soins à prendre sont de boucher le flacon aussitôt qu'on a démonté la pile et de bien laver le platine et le zinc.

De Moleyns [*l'Institut,* t. X (1842)] emploie l'élément de Grove, mais en remplaçant l'eau acidulée sulfurique par une dissolution de sel ammoniac et l'acide azotique par un mélange de 6 parties d'azotate d'ammoniaque et de 2 d'eau, auquel on ajoute un volume égal d'acide sulfurique que l'on verse graduellement et en refroidissant au besoin, de manière qu'il n'y ait pas d'échauffement.

On emploie le zinc en feuilles et non amalgamé. On peut encore remplacer le platine par une lame de buis bien enduite de plombagine, ce qui fait rentrer cette modification dans le type Bunsen.

Swan [*Fortschritte* (1847)] propose, pour l'usage de la té-

Digitized by Google

légraphie, de remplacer l'eau acidulée sulfurique par une dissolution de sulfate de potasse.

Deroy [*Fortschritte* (1848)] obtient une pile suffisamment constante pour les besoins de la télégraphie en faisant plonger le platine dans une dissolution concentrée d'azotate de potasse et le zinc dans une dissolution saturée de sulfate de zinc, acidulée d'acide sulfurique.

Callan [*Philosophical Magazine*, t. XXXI (1847); *Archives de Genève*, t. VI] remplace dans la pile de Grove la lame de platine par du plomb platiné et l'acide azotique par un mélange de 4 parties d'acide sulfurique concentré, 2 d'acide azotique et 2 d'une solution saturée d'azotate de potasse. Cette pile donnerait, d'après l'auteur, des effets plus intenses que ceux de la pile de Grove, surtout au bout de quelques heures.

Dans les deux premières heures, la pile de Grove serait plus énergique; mais l'inverse se produirait bientôt, et la pile à lame de plomb deviendrait la plus forte des piles connues.

On pourrait, sans abaisser la force au-dessous de celle de l'élément à platine, remplacer le plomb par du fer battu. L'auteur a fait construire, d'après ce système, pour le Collège de Maynooth, deux énormes piles : la première contient $7^{mq},7$ de zinc et $6^{mq},1$ de fer; la seconde $7^{mq},4$ de zinc et $5^{mq},6$ de fer.

Poggendorff [*Poggendorff's Annalen*, t. CXXXIV (1868); *Archives de Genève*, t. XXXIV)] trouve que la pile de Grove pèche souvent par suite de l'imperfection de la soudure qui réunit la lame de platine à la pince qui reçoit le fil conducteur. Il faut protéger cette soudure par un vernis, lequel finit toujours par être attaqué.

Poggendorff ferme alors le vase poreux par un couvercle de serpentine, matière qui a le double avantage de se laisser facilement travailler au tour et de ne pas être attaquée par l'acide azotique. Le rebord du couvercle sert en même temps à maintenir le vase poreux fixe dans l'intérieur du cylindre de zinc.

Le couvercle est percé en son milieu d'un trou qui donne passage à une tige en platine, destinée à relier l'électrode positive au fil conducteur. A sa partie inférieure, cette tige est

Digitized by Google

fendue de manière à former une sorte de pince portant deux lames de platine demi-cylindriques, appliquées l'une contre l'autre en forme de 8 dont les deux branches seraient ouvertes, ce qui augmente la surface de l'électrode. A sa partie supérieure, la tige se termine en pas de vis qui porte deux écrous: l'un est simplement la pince de laiton pour le fil conducteur; l'autre est une rondelle de platine qui s'applique contre la partie inférieure du couvercle.

Cette disposition présente l'avantage d'une grande solidité, car elle évite toute soudure et tout mastic; mais elle est fort coûteuse et doit être, de ce fait, inférieure à la disposition proposée par de la Rive, dans laquelle la feuille de platine, étant enroulée et maintenue autour du diaphragme, n'exige qu'une soudure très faible pour arriver à une solidité bien suffisante dans la pratique.

§ II. — Type de Bunsen :
ZINC, CHARBON, ACIDE AZOTIQUE, LIQUIDE DÉPOLARISANT.

La première idée d'employer le charbon dans les piles paraît due à Chevreusse, professeur de Chimie à l'École d'artillerie et de génie de Metz [*Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXIX (1825)]. Dans un Mémoire présenté à l'Institut en 1823, il propose nettement de substituer au pôle cuivre, dans les piles, une lame de charbon fortement calciné ou de coke provenant des hauts-fourneaux.

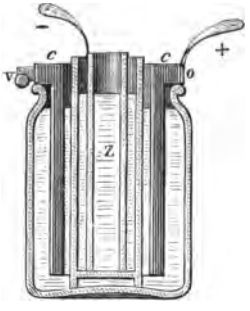
Cooper [*Philosophical Magazine*, t. XVI (1840)] emploie plus tard le graphite, et Schönbein [*Poggendorff's Annalen*, t. XLIX (1840)] le charbon des cornues à gaz, à la place du platine dans l'élément de Grove. On peut citer encore Silliman, qui remplace le platine du même élément par une plaque de graphite naturel ou travaillé comme celui des creusets [*American Journal of Science and Arts*, t. XLIV; *Archives de l'électricité*, t. III (1842)]. Ces lames se détériorent assez vite et se désagrègent. Enfin Bunsen vulgarisa l'emploi du charbon en indiquant un mode particulier de fabrication qui donne de bons

Digitized by Google

résultats [*Poggendorff's Annalen*, t. LIV et LV (1842); *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XVI (1843)]. Bunsen obtenait des cylindres de charbon en délayant 2 parties de braise et 1 de coke avec une dissolution concentrée de sucre ou du goudron de houille, et chauffant le tout au rouge vif dans des moules en fer. Le cylindre creux ainsi obtenu était, dans la pile primitive de Bunsen, rempli de sable imbibé d'acide azotique, dans lequel s'enfonçait le vase en terre poreuse contenant le zinc et l'eau acidulée.

Bunsen a ensuite employé des cylindres de charbon *c* percés de trous, qui permettaient plus facilement aux gaz de s'é-

Fig. 86.



chapper. Les cylindres plongeaient alors directement dans l'acide azotique (*fig.* 86).

Pour réunir le charbon d'un couple au zinc du couple suivant, on employait des colliers de cuivre *o* munis d'une patte soudée au zinc, et qu'on serrait d'autre part autour du charbon au moyen d'une vis de pression. Ce modèle à charbon extérieur moulé est encore employé en Allemagne.

Comme les colliers de cuivre étaient très vite rongés et mis hors d'usage par l'acide azotique, Deleuil [*l'Institut*, t. XVIII (1850)] a imaginé de les remplacer par des colliers de verre, qui seraient alors inaltérables et construits assez solidement pour pouvoir supporter de dedans en dehors, c'est-à-dire sur le coin en contact avec le charbon, une pression de 120^{kg}.

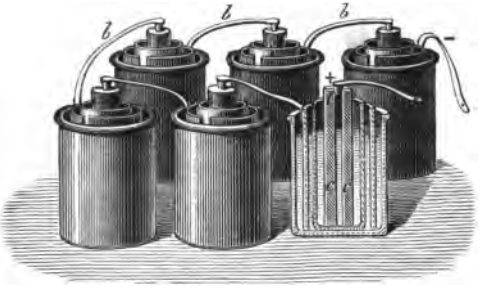
C'est Archereau qui a proposé le premier la forme actuelle-

Digitized by Google

ment adoptée, consistant à mettre le zinc à l'extérieur et à placer dans le vase poreux de l'acide azotique et une baguette rectangulaire de charbon des cornues. Le charbon est alors beaucoup plus facile à fabriquer et moins coûteux.

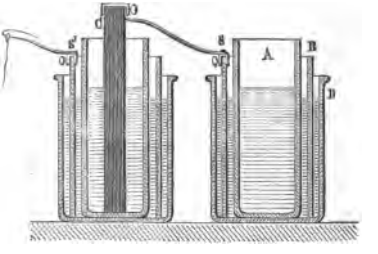
Deleuil a imaginé ensuite de remplacer les colliers qui servaient à l'assemblage par des trous percés sur la face supérieure des baguettes de charbon, et dans lesquels s'enfoncent à frottement dur des cônes de cuivre qui terminent des pattes

Fig. 87.



soudées aux zincs (*fig.* 87). Cette disposition a été longtemps la plus employée, mais on préfère aujourd'hui celle qui consiste à réunir le zinc au charbon par des pattes de cuivre indé-

Fig. 88.



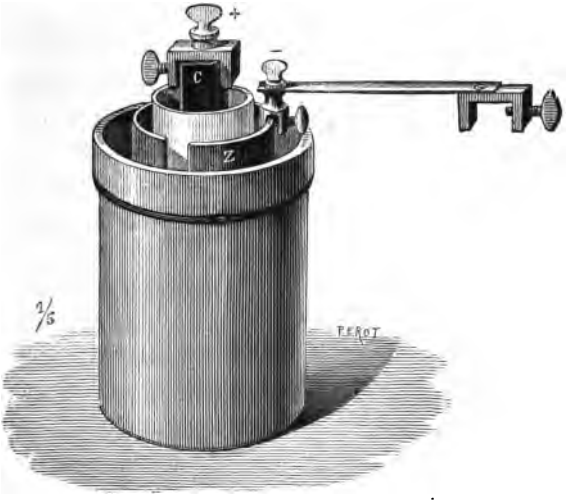
pendantes, fixées à la fois au zinc et au charbon par des pinces mobiles de laiton (*fig.* 88 et 89).

La *fig.* 89 représente à une grande échelle l'élément de Bunsen tel qu'on l'emploie d'ordinaire en France (charbon intérieur) avec le détail des pinces d'assemblage.

Digitized by Google

La force électro-motrice de la pile Bunsen est à peine de 3 pour 100 inférieure à celle de la pile de Grove : elle est donc de $1^{volt},90$ environ. Quant à sa résistance, elle varie avec les

Fig. 89.



charbons employés, mais est toujours, à dimensions égales, bien plus faible que celle de la pile Daniell.

La pile de Bunsen est, en somme, à peu près identique à celle de Grove; le charbon avait été employé bien antérieurement, et Grove lui-même y avait songé et n'avait été arrêté que par des questions de détail. Elle possède la plupart des avantages de la pile de Grove; toutefois sa force électro-motrice est très légèrement inférieure. C'est encore, de toutes les piles connues, celle qui possède à la fois la plus grande force électromotrice et la plus faible résistance; aussi, malgré ses nombreux inconvénients et surtout les vapeurs acides qu'elle dégage, est-elle la plus employée toutes les fois que l'on veut une pile très puissante, par exemple pour produire de la lumière électrique. On se sert toujours beaucoup de cette pile quand on ne dispose pas de force motrice ni de machine électro-magnétique, ou qu'on redoute les irrégularités dont les meilleures machines ne sont pas exemptes.

Digitized by Google

C'est au moyen de piles de Bunsen composées chacune de 60 éléments que M. Duboscq obtient la lumière électrique qui est employée sur la scène de l'Opéra de Paris. Nous empruntons à son expérience les détails suivants pour le montage rapide d'une pile puissante.

Les vases extérieurs de terre sont disposés d'avance sur une table en deux rangées parallèles de 30 éléments, qui ne feront plus tard qu'une seule série. Il est bon de ne pas mettre les vases sur plus de deux lignes, afin qu'ils restent toujours à la portée de la main et qu'on puisse rapidement remplacer un des éléments s'il se comporte mal. Les vases sont remplis au préalable de la quantité convenable d'eau acidulée; ils sont posés sur une table recouverte d'une plaque de verre ou de porcelaine, substances inattaquables aux acides; autant que possible on doit veiller à ce qu'il n'y ait pas de liquide répandu sur les tables, afin que les éléments restent parfaitement isolés les uns des autres.

Les vases poreux, contenant le prisme de charbon et l'acide azotique, sont placés en temps ordinaire dans une cuve remplie également d'acide azotique; de cette façon l'acide intérieur ne peut pas s'échapper à travers les pores du vase, et celui-ci est tout prêt quand on veut s'en servir. La cuve est fermée par un couvercle qui empêche les émanations.

Pour monter la pile, on commence par s'assurer que toutes les pinces et les lames de cuivre qui doivent relier les éléments les uns aux autres sont bien propres; puis on met dans chaque vase de terre, dans lequel est déjà l'eau acidulée, un cylindre de zinc amalgamé; ensuite on prend dans la cuve les vases poreux contenant l'acide azotique et le charbon, on les place au milieu des zincs et on met les pinces et les tiges de communication. Un ouvrier exercé peut ainsi monter une pile de 60 éléments en moins d'une demi-heure.

Ce mode de montage est préférable à celui qui consiste à disposer d'abord toute la pile avec ses contacts et sans liquides, puis à verser ceux-ci.

Il convient d'employer, pour aciduler l'eau, de l'acide sulfu-

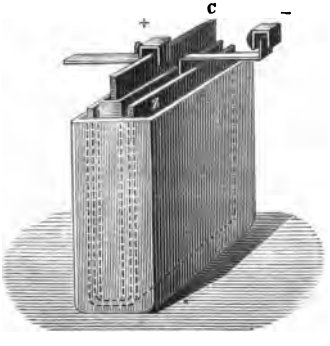
Digitized by Google

rique fabriqué avec du soufre et non avec des pyrites. Dans ce cas, en effet, l'acide contient des impuretés (arséniures et sulfures) qui font obstacle au bon fonctionnement de la pile. Si, pendant la marche, on voit l'eau acidulée d'un élément bouillonner violemment et sa température s'élever beaucoup, c'est que le zinc est mal amalgamé ; il faut alors retirer immédiatement cet élément et le remplacer par un autre.

Quand on démonte définitivement la pile, il est inutile de laver les charbons et les vases poreux ; il vaut mieux au contraire les laisser imbibés d'acide azotique. Les zincs sont mis à sécher après avoir été rincés à l'eau pure. Si l'acide azotique n'a servi que deux ou trois heures, on pourra l'employer une deuxième fois en le mélangeant avec son volume d'acide neuf; il est préférable toutefois, quand cela est possible, de le revendre pour les industries qui n'ont pas besoin d'acide très pur ni très fort, et de prendre toujours de l'acide neuf. Quant à l'eau acidulée, le mieux est de la jeter et d'en employer chaque fois de nouvelle.

On a adapté à l'élément Bunsen la forme plate indiquée précédemment pour la pile de Grove et qui permet, tout en dimi-

Fig. 90.



nuant la quantité de liquide, d'augmenter les surfaces en présence et de rapprocher les différentes parties de la pile, ce qui diminue beaucoup la résistance (*fig.* 90). Dans le modèle

Digitized by Google

plat de $0^m,20$ de hauteur, la résistance peut tomber à $0^{ohm},060$; ce sont ces éléments qui sont employés pour actionner les grandes bobines de Ruhmkorff.

La pile de Bunsen, comme celle de Grove, est bien moins constante que celle de Daniell, à cause de l'altération progressive des liquides; sa résistance va alors en augmentant. C'est là un des principaux inconvénients de la pile à acide azotique. Un autre inconvénient plus grave encore est le dégagement de vapeurs nitreuses. Archereau [*les Mondes*, t. II (1863)] propose, pour les arrêter, de recouvrir le vase poreux d'un récipient contenant des rognures de fer-blanc retenues par une grille de fil de fer.

Reinsch [*Fortschritte* (1848)] remplace le cylindre de charbon par de la poussière de coke tassée dans le vase poreux, qu'on imbibe d'acide azotique et dans laquelle on enfonce un morceau de coke pour servir d'électrode.

Liais et Fleury [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXXV (1852)] suppriment le diaphragme et maintiennent le charbon imprégné d'acide azotique, en y creusant une cavité que l'on remplit d'acide quand le charbon est intérieur; dans le cas contraire, on entoure extérieurement le charbon d'un cylindre de verre qui est mastiqué à la partie inférieure, et l'intervalle annulaire compris entre le verre et le charbon est rempli d'acide azotique. La suppression du diaphragme augmente considérablement la conductibilité intérieure de la pile.

Si l'on veut avoir une pile résistante, il suffit de prendre le charbon imprégné d'acide azotique par le procédé indiqué plus haut, et de l'enfermer dans un vase poreux rempli simplement d'acide sulfurique concentré. On peut même faire plonger ce premier vase poreux dans un second contenant de l'acide un peu plus faible, celui-ci dans un autre encore plus étendu, et ainsi de suite, jusqu'à l'eau acidulée dans laquelle est le zinc. On a ainsi un accroissement de résistance considérable.

Magrini [*Fortschritte* (1856)] remplace l'acide sulfurique étendu par l'acide chlorhydrique; mais celui-ci a l'inconvénient

Digitized by Google

d'attaquer le zinc, même amalgamé, beaucoup plus que l'acide sulfurique, quand le circuit est ouvert.

Omeganck (*Cosmos*, t. XVI) remplace l'acide sulfurique par une dissolution de sulfate de mercure, ce qui a l'avantage d'entretenir l'amalgamation du zinc. D'ailleurs, on atteint ce dernier résultat en laissant simplement une petite couche de mercure au fond du vase quand on emploie de l'eau acidulée sulfurique.

Dans la pile du Moncel [*Fortschritte* (1856)], le vase poreux contient une pâte formée de poussière de charbon et de sciure de bois avec une dissolution d'azotate d'ammoniaque. Dans le vase de terre, autour du vase poreux, on met une autre pâte formée de limaille de zinc et de sciure de bois avec une dissolution d'azotate. Dans chaque vase plonge un fil de cuivre pour recueillir l'électricité et servir de pôle.

On obtient avec cette disposition des courants assez faibles, mais très constants.

Thomas [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t.XLIX (1859)] propose de faire rendre les gaz qui se dégagent de la pile de Bunsen dans un vase poreux où ils seraient décomposés. Cette décomposition serait accompagnée de la production d'un courant que l'on pourrait ajouter au courant principal.

L'auteur n'indique pas autrement la disposition de sa pile.

Zaliwski-Mikorski [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXII (1866)] emploie une couche d'huile à la surface du zinc dans la pile Bunsen. Cela permettrait de supprimer l'amalgamation et accroîtrait considérablement la durée du courant. Selon l'auteur, l'huile interviendrait comme corps riche en hydrogène, c'est-à-dire comme corps combustible. Le zinc ne doit pas être noyé dans l'huile, mais en être simplement humecté. L'éther et les carbures d'hydrogène liquides produiraient le même effet que l'huile.

Le même auteur [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXII (1866)] donne à la pile de Bunsen une forme analogue à celle de la pile à auges.

Digitized by Google

Le vase unique est une auge en bois recouverte à l'intérieur d'un enduit inaltérable aux acides et contenant alternativement des cloisons de charbon et d'une substance poreuse quelconque, par exemple de terre de pipe. Une face de chaque lame plonge dans l'acide azotique, l'autre dans de l'eau salée ou acidulée d'acide sulfurique. Dans les compartiments à eau acidulée, on met de la grenaille de zinc ou une lame de zinc mobile à volonté. Dans les deux dernières auges sont une lame de charbon et une lame de zinc pour servir de pôles.

Deux rigoles latérales amènent, à l'aide d'entailles, les liquides dans leurs cases respectives. Elles servent en même temps à recueillir ces liquides quand l'opération est terminée. Pour cela, les cases à acide azotique sont munies à leur partie supérieure d'un couvercle qui ferme à moitié. On penche l'auge de ce côté pour recueillir l'eau, puis en sens inverse pour l'écoulement de l'acide azotique.

Comme enduit sur le bois, on peut employer soit un mélange de suif et de résine, soit, quand on veut un mastic plus résistant, un mélange de sulfate de baryte et de caoutchouc dissous dans une essence.

Pour rendre encore plus facile le maniement de sa pile à auges, Mikorski [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXIII (1866)] lui apporte une petite modification.

Pour la remplir, on verse le liquide dans une des auges, et une rigole pratiquée à la partie inférieure le transporte dans tous les compartiments analogues, et dans ceux-là seulement. La force du courant augmente à mesure que l'on remplit l'auge, et l'on est libre de s'arrêter où l'on veut.

Pour vider, on commence par ajouter un peu de liquide; le niveau normal s'élève et amorce un siphon, dont la branche extérieure est mobile, à l'aide de tubes en caoutchouc, et dont la branche intérieure fixe, noyée dans le mastic, sort de la rigole inférieure qui met en communication toutes les auges analogues. Grâce à cette disposition, on n'a plus jamais besoin de déplacer l'auge.

Digitized by Google

Enfin, le mastic est composé essentiellement de soufre.

Au lieu de mettre dans les compartiments à eau acidulée de la grenaille de zinc, il y met aussi des lames de zinc reposant contre le charbon et sur une saillie que ce dernier porte à sa partie inférieure, de sorte que la communication entre le zinc et le charbon s'établit par le seul poids du métal.

Ces lames de zinc, au lieu d'être amalgamées, peuvent être préservées par l'huile, comme l'auteur l'a lui-même indiqué.

Dans une autre Communication parue dans le même Volume, Zaliwski-Mikorski prétend avoir observé que, en substituant le mercure à l'eau acidulée au contact du zinc dans une pile de Bunsen, la pile fonctionne comme d'ordinaire (?).

Le même auteur [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXIV (1867) et t. LXX (1870)] propose encore la pile suivante : au centre, un premier vase poreux contenant un charbon et de l'acide azotique; ce vase plonge dans un second rempli d'acide sulfurique; enfin, le vase extérieur renferme le zinc et une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque; de la sorte, il n'y a plus d'effervescence, et le zinc se consume peu à peu sans déperdition inutile.

Miergues [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVI (1868)] a imaginé une disposition qui supprime à la fois les deux vases dans la pile de Bunsen. Le charbon possède alors la forme d'un vase poreux et contient dans son intérieur l'acide azotique. Le vase extérieur est formé par un cylindre de zinc amalgamé, fermé au fond par un disque de caoutchouc, et qui contient l'eau pure ou acidulée.

On emploie encore, sous le nom de *pile Faure*, une pile qui paraît identique à la pile Miergues; comme dans cette dernière, l'acide azotique est contenu dans un vase formé d'un mélange de plombagine et d'argile, et qui plonge directement dans l'eau acidulée du vase extérieur.

La consommation d'acide azotique paraît moins grande que dans le modèle ordinaire de Bunsen, mais quelques expérimentateurs ont rencontré avec la pile Faure de sérieuses difficultés; huit couples montés avec soin n'ont pu porter à l'incandescence

Digitized by Google

l'extrémité d'un charbon de $\frac{10}{10}$ [*la Lumière électrique*, p. 113 (1879)]. Cet insuccès tient probablement à la mauvaise conductibilité des bouteilles ou à leur porosité insuffisante. La qualité du charbon a beaucoup plus d'influence, en effet, dans cette pile que dans la pile Bunsen ordinaire.

On a cherché à effectuer rapidement le montage et le démontage des piles composées d'un grand nombre d'éléments. Il n'y a guère de difficultés pour une pile à un seul liquide. La disposition des piles de Wollaston (*fig.* 28) sera toujours recommandable. Mais, avec les piles à deux liquides, la séparation des deux vases complique beaucoup l'opération; c'est surtout avec la pile de Bunsen que la difficulté est la plus grande, à cause de l'action corrosive de l'acide azotique qui se répand nécessairement quand on enlève le charbon. Aussi les efforts des constructeurs et des physiciens se sont-ils portés de ce côté.

M. du Moncel ajuste les vases poreux contenant l'acide azotique et le charbon dans des trous pratiqués dans une planche de bois, qui est enduite de cire à bouteille. Une rondelle de gutta-percha, interposée entre le bord du trou et le vase poreux, empêche l'infiltration de l'acide azotique dans le bois, qui, sans cette précaution, serait rapidement détruit. Les charbons sont maintenus fixes dans les vases poreux par des cales de bois recouvertes de cire, qui ferment à peu près complètement les vases; ceux-ci présentent d'ailleurs un petit trou au-dessous de la planche qui les porte. On en verra plus loin l'usage.

Les cylindres de zinc sont semblablement ajustés sur une seconde planche de bois, percée de larges trous pour les recevoir. Sur cette planche sont fixés des fils de cuivre recouverts de gutta-percha, qui sont soudés aux zincs et se terminent d'autre part par des bouchons de cuivre qui peuvent entrer dans des godets creusés au sommet des charbons et remplis de mercure.

Pour démonter cette pile, on détache les bouchons et l'on enlève d'un coup la planche qui porte tous les vases poreux.

Digitized by Google

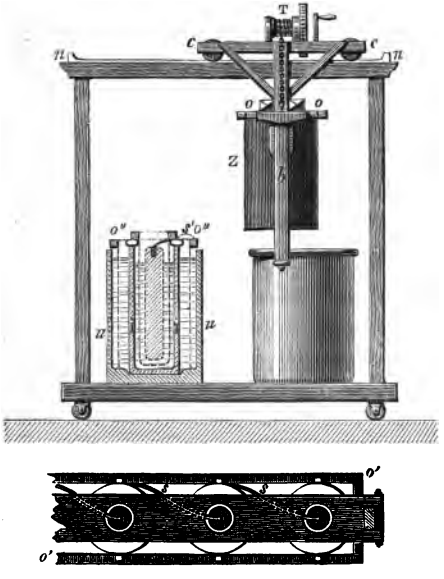
On les porte dans une série de vases fixés près de là et contenant de l'acide azotique. De cette façon, les vases poreux sont soustraits à l'évaporation et restent remplis jusqu'au petit trou pratiqué au-dessous de la planche.

On n'a plus qu'à enlever la seconde planche portant les zincs pour terminer l'opération. Le remontage est aussi simple que le démontage.

M. Daguin a employé la disposition suivante, qui peut s'appliquer à un grand nombre d'éléments (*fig.* 91).

Les éléments sont placés sur une seule rangée, et à côté se trouve une seconde rangée de vases de verre, fixés dans une auge unique, qui peut être en bois. Les vases de verre contiennent de l'acide azotique, et l'auge de l'eau ordinaire. Les zincs et les vases poreux de la pile avec leurs charbons sont

Fig. 91.



fixés à une même traverse de bois; il faut donc, pour demonter la pile, élever la traverse et l'apporter au-dessus de la rangée de vases à acide azotique fixés dans l'auge, puis

Digitized by Google

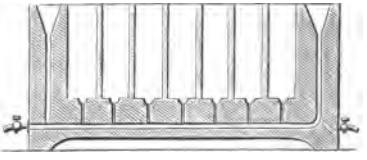
abaisser la traverse de façon que les zincs soient immergés dans l'eau de l'auge et les vases poreux dans les vases de verre. Pour cela, la traverse est soutenue par une chaîne à la Vaucanson, que l'on manœuvre à l'aide d'un treuil mobile sur des rails fixés au bâti de l'appareil. Quand la traverse a été élevée au-dessus des vases de la pile, on fait glisser le treuil sur les rails et on amène la traverse au-dessus de l'auge. Il n'y a plus qu'à la faire redescendre.

Les vases poreux sont d'ailleurs bouchés et entourés de bourrelets de caoutchouc qui ferment les vases d'acide azotique, de sorte que l'évaporation de cet acide est évitée pendant le repos.

On a vu à l'Exposition universelle de 1855, à Paris, un système dû à MM. Jedlick et Csapo, et qui offre l'avantage d'être peu encombrant, facile à monter et à démonter. Voici ce système, perfectionné par M. Marçais en 1859.

Les éléments sont rassemblés dans une auge unique (*fig.* 92), coulée en un seul bloc de matière isolante. Cette matière est composée de soufre, d'oxyde de fer et d'amiante, et se façonne à chaud à l'état pâteux. Après le refroidissement, elle devient très dure et inattaquable aux acides. Des

Fig. 92.



cloisons transversales partagent l'auge en compartiments; chaque compartiment renferme un des éléments. Un élément se compose de deux lames de zinc parallèles communiquant avec un rhéophore de cuivre extérieur et d'un vase poreux placé entre ces lames, qui renferme l'acide azotique ainsi que le charbon. Ce vase poreux est constitué par un cadre fait de la même substance que l'auge, et sur chaque face duquel on a collé au collodion une feuille de papier xyloïdé, c'est-à-dire

Digitized by Google

préparé à l'acide azotique fumant, comme le fulmicoton. C'est à travers ces feuilles de papier que s'accomplit la dépolarisation, et, comme elles sont excessivement minces, la résistance de la pile est très faible, comparée à celle des piles de Bunsen ordinaires.

Les charbons, taillés en lames rectangulaires, sont réunis aux rhéophores de cuivre de la manière suivante. La partie supérieure a été trempée dans un bain de stéarine, ce qui empêche l'acide azotique de monter par capillarité. Le bord est ensuite poncé et recouvert de cuivre par la galvanoplastie. On soude enfin à l'étain le rhéophore extérieur sur la couche de cuivre.

Les rhéophores des divers éléments sont réunis à l'aide de deux rainures parallèles, creusées sur le couvercle de l'auge. Il y a dans chaque rainure autant de compartiments qu'il y a d'éléments, et l'on y met du mercure pour établir les communications.

Mais ce qui caractérise surtout cette pile, c'est le mode d'introduction et d'extraction des liquides, qui s'opère avec la plus grande facilité. Il y a dans l'épaisseur de l'auge isolante (*fig.* 92) deux conduits qui servent l'un à l'acide azotique, l'autre à l'eau acidulée. A l'extrémité supérieure de chaque conduit est un entonnoir pour l'introduction du liquide, et à l'extrémité inférieure est un robinet pour l'évacuation. De plus, chaque conduit, s'étendant au fond de l'auge, est percé de petits trous qui s'ouvrent dans chaque compartiment. La rangée de trous qui débouchent librement dans chaque auge sert à l'eau acidulée; l'autre rangée débouche exclusivement dans les vases poreux et sert à l'acide azotique. Comme on doit pouvoir enlever aisément les vases poreux pour les réparations, on n'a pas voulu fixer ces vases au fond de l'auge, ce qui aurait permis d'établir une communication fixe avec le conduit à acide azotique. Voici comment on a résolu la difficulté : chaque trou débouche au fond de l'auge dans une cavité hémisphérique, et le vase poreux présente une saillie de même dimension que la cavité, percée d'un petit trou,

Digitized by Google

laquelle s'emboîte exactement dans la cavité, et c'est par là que l'acide azotique peut entrer dans le vase poreux ou qu'il peut en sortir au gré de l'opérateur.

On aurait pu craindre que la communication établie entre les divers éléments par les liquides qui restent dans les conduits ne diminuât la force de la pile. Il paraît que cet inconvénient ne se présente pas.

La pile de MM. Jedlick et Csapo mérite une sérieuse attention. Sa puissance résulte du peu d'épaisseur donnée aux éléments; cette épaisseur est encore moindre que celle des éléments de Grove ou de Bunsen à auges rectangulaires. Toutefois la faible quantité de liquides que cette pile contient doit restreindre notablement la durée de son fonctionnement.

L'emploi de réservoirs à acide placés dans le voisinage de la pile et de siphons pour transvaser les liquides simultanément dans tous les vases est fréquemment adopté. M. Archereau a réussi à charger une pile de 100 éléments en quelques minutes. Mais nous ne pensons pas que les méthodes de ce genre soient favorables à la conservation des pièces solides qui composent les éléments. La séparation des parties imprégnées d'acide azotique et des autres parties de la pile est indispensable, à cause de l'action corrosive des vapeurs nitreuses. Il faut en venir à des dispositions plus ou moins semblables à celles de MM. du Moncel et Daguin. Nous décrirons toutefois, comme étant la plus récente, une de ces méthodes rapides qui peuvent trouver leur application : c'est celle de M. d'Almeida.

D'Almeida [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. LXXI (1870)] propose la manière suivante de disposer la pile de Bunsen; cette disposition peut être appliquée, du reste, à toute espèce de pile à deux liquides. Il réunit 16 éléments dans une même caisse carrée, séparée par des cloisons de gutta-percha en seize compartiments, qui contiennent chacun un cylindre de zinc, le vase poreux et le charbon; le tout est disposé de telle sorte que tous les éléments puissent être montés ou démontés à la fois et très rapidement. Pour cela, sur le fond de chaque case débouche un

Digitized by Google

tube qui, se recourbant deux fois, monte le long des parois extérieures de la caisse et se termine un peu au-dessus du niveau où doit s'élever le liquide dans l'élément. Ces seize tubes sont ensuite réunis par un seul tuyau destiné à amener ou à enlever l'acide, et qui est mis en communication par un tube de caoutchouc avec la tubulure inférieure d'un flacon bitubulé, analogue à ceux qu'on emploie pour les appareils à dégagement continu d'hydrogène. Ce flacon contient la quantité d'eau acidulée nécessaire pour tous les éléments; en l'élevant suffisamment, le remplissage de tous les compartiments se fait de lui-même. Pour vider les vases, ce qui revient à démonter la pile, il suffit de descendre le flacon après l'avoir incliné vivement, de manière à remplir les tubes du liquide qui reste en excès dans le fond du flacon. Tous les tubes, étant alors remplis, fonctionnent comme siphons.

Les vases poreux s'emplissent et se vident par le même système; le seul inconvénient est ici que l'acide azotique ronge peu à peu le tube de caoutchouc qui relie le flacon au tube fixe de conduite générale; malgré cela, le tube de caoutchouc peut encore servir de quinze jours à trois semaines.

Dès que la pile est montée, elle fonctionne à la manière d'une pile de Bunsen ordinaire, et tous les compartiments sont complètement séparés les uns des autres. C'est ce qui distingue cette disposition de quelques autres en apparence analogues, où les liquides des différents éléments continuent de communiquer entre eux; par ces communications s'établissent des courants dérivés qui occasionnent une perte souvent assez élevée (quelquefois du quart du courant total). Dans le cas actuel, au contraire, il n'y a aucune perte à craindre, et l'auteur a vérifié par expérience que les 16 éléments de sa caisse valaient exactement le même nombre d'éléments Bunsen ordinaires.

On peut rendre cette pile transportable et capable même de supporter des chocs violents; pour cela, il faut fabriquer la caisse, les tubes et les flacons en gutta-percha, qui est la substance la moins cassante, et fixer une fois pour toutes les pièces

Digitized by Google

dans la position qu'elles doivent occuper. Le zinc doit entrer assez juste dans les compartiments; les charbons sont retenus invariablement dans le vase poreux par des bouchons; tous les vases poreux sont fermés, et la caisse entière peut l'être elle-même, au moyen d'un couvercle qui s'abat sur un tube creux de caoutchouc que le couvercle écrase incomplètement et qui est placé dans une rainure ménagée sur le bord supérieur de la caisse. On obtient de la sorte une fermeture hermétique. Il sera toujours, cependant, plus prudent de conserver la pile démontée pendant le transport, puisque, pour la remettre en activité, il suffit d'adapter les deux flacons à liquide.

Inutile de dire que, dans un laboratoire, ces fermetures sont inutiles; la cuve, les tubes et les flacons sont fabriqués en grès, en porcelaine ou en verre. La pile devient alors fort peu coûteuse et bien plus commode à manier que les piles ordinaires; de plus, on réalise une notable économie de liquides excitateurs, car, dans le courant d'une série d'expériences, l'appareil peut être démonté pendant les intervalles, souvent assez longs, qui séparent deux expériences. La dépense de liquide et de zinc devient, grâce à cette disposition, en rapport rigoureux avec les effets produits.

§ III. — Piles dérivant de celle de Bunsen avec un métal négatif autre que le zinc.

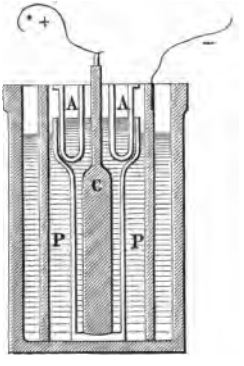
M. Rousse, professeur de Physique au Lycée de Saint-Étienne, a cherché l'un des premiers à rendre la pile de Bunsen plus économique en utilisant les résidus, et moins désagréable en évitant les émanations nitreuses.

Le charbon C est dans un vase poreux central (*fig.* 93) qui contient l'acide azotique. Un godet annulaire A, contenant de l'acide oléique, est placé au sommet du vase poreux et retient les vapeurs nitreuses, lesquelles produisent avec l'acide oléique de l'acide élaïdique, utilisable dans la fabrication des bougies. Le vase extérieur contient de l'eau pure et un cylindre de

Digitized by Google

plomb P que l'acide azotique qui passe à travers le vase poreux convertit en azotate de plomb. Ce sel, traité par le carbonate de potasse, produit du carbonate de plomb (céruse) et de l'azotate de potasse (salpêtre), c'est-à-dire des substances commerciales.

Fig. 93.



D'après M. du Moncel, la force électro-motrice de cet élément vaut 1, 3, comparée à celle de l'élément Daniell.

M. Rousse a aussi essayé le fer au lieu du plomb. La force électro-motrice était un peu plus faible. Le défaut de constance empêche ce système de recevoir beaucoup d'applications.

La pile de Maiche [*les Mondes,* t. V (1864)] n'est autre qu'une pile de Bunsen très légèrement modifiée, de manière à donner un courant plus constant. Elle se compose, comme la pile de Bunsen, d'un vase en grès et d'un cylindre de terre poreuse plein d'acide azotique ordinaire; dans l'acide plonge un prisme quadrangulaire de charbon des cornues fixé à un couvercle de terre ou de porcelaine qui ferme le cylindre poreux. La seule nouveauté de cette pile est que le cylindre de zinc et l'eau acidulée sulfurique de la pile de Bunsen y sont remplacés par un cylindre de tôle et de l'eau acidulée par un centième d'acide azotique.

Le courant dans cette pile serait, d'après l'auteur, plus constant que dans celle de Bunsen pour les raisons suivantes.

Digitized by Google

L'acide azotique du vase poreux passe peu à peu à travers la cloison dans le vase extérieur, ce qui ne fait qu'accroître l'énergie de l'eau acidulée et empêche en partie le courant de diminuer. Le fer s'attaque moins vite que le zinc et donne, par suite, une action plus régulière. Enfin, la proportion d'acide azotique réduit dans le vase poreux est très petite et même, théoriquement, devrait être nulle; de la sorte, le liquide dépolarisant s'altère peu, ce qui assure la constance du courant, en même temps que l'inconvénient résultant du dégagement des vapeurs nitreuses est supprimé ou tout au moins bien diminué.

Il est facile de comprendre pourquoi il ne devrait pas y avoir de dégagement nitreux. On sait, en effet, que, si l'on attaque du fer par de l'acide azotique étendu, il se forme de l'azotate de fer, de l'azotate d'ammoniaque et du sesquioxyde de fer, en même temps qu'il se dégage un mélange de protoxyde et de bioxyde d'azote. La formation de tous ces corps est expliquée par les équations suivantes :

$$3\,Fe + 4\,AzO^5 = 3\,(FeO, AzO^5) + AzO^2,$$
$$4\,Fe + 5\,AzO^5 = 4\,(FeO, AzO^5) + AzO,$$
$$2\,Fe + AzO^5 = Fe^2O^3 + AzO^2,$$
$$8\,Fe + 10\,AzO^5 + 4\,HO = 8\,(FeO, AzO^5) + AzH^4O, AzO^5.$$

Toutes ces réactions se font simultanément et dans des proportions éminemment variables avec les circonstances. Le protoxyde d'azote se dégage et le bioxyde va se dissoudre en plus grande partie dans l'acide azotique du vase poreux; il ne doit donc presque pas y avoir de dégagement nitreux. Cependant il s'en produit un peu, car l'acide azotique du commerce contient toujours des traces d'acide sulfurique et d'acide chlorhydrique qui agissent sur le fer et dégagent de l'hydrogène qui va réduire de l'acide azotique dans le vase poreux; de plus, l'acide azotique lui-même donne des vapeurs nitreuses sous l'influence de la lumière et de la chaleur. Mais, en tous cas, ce qui se dégage est très peu de chose et est facilement arrêté par le couvercle de terre qui ferme le vase poreux.

La seule précaution à prendre pour assurer le bon fonction-

Digitized by Google

nement de la pile est de nettoyer tous les trois ou quatre jours les cylindres de fer, ce qui, du reste, est très facile, le dépôt qui se forme à leur surface n'étant pas adhérent.

Les avantages de la modification apportée par Maiche à la pile de Bunsen seraient donc une plus grande constance dans le courant et la suppression des vapeurs nitreuses; seulement, la force électro-motrice est un peu diminuée. En effet, la force électro-motrice du fer au contact des acides est moindre que celle du zinc. De plus, dans la pile de Bunsen, les deux liquides séparés par la cloison poreuse étaient différents, et il y avait une force électro-motrice spéciale produite à leur contact, ce qui n'a plus lieu dans la pile de Maiche, où le même liquide se retrouve des deux côtés de la cloison. Aussi sa force électro-motrice n'est que les huit dixièmes de celle de Bunsen. Ce nombre a été déterminé par Calla, qui a étudié cette pile au point de vue pratique. La conclusion à laquelle il arrive est que, malgré sa moindre énergie, on doit la préférer à la pile de Bunsen, à cause de la suppression des vapeurs nitreuses et surtout de sa constance et de sa longue durée. Une pile de 4 éléments est restée montée pendant un mois entier sans qu'on ait renouvelé l'acide. Au bout de ce temps, son courant était encore assez puissant pour faire supporter le poids d'un homme à un électro-aimant de $0^m,12$ de haut, dont les bobines, formées par un fil de cuivre de $0^m,001$, avaient $0^m,085$ de diamètre.

MM. Alix et Henry remplacent simplement le zinc de la pile de Bunsen par une lame d'aluminium; alors aucune des deux électrodes ne paraît attaquée, et la pile ne fonctionne plus que comme les éléments à un métal et deux liquides de Becquerel.

Dans la pile Balsamo [*les Mondes*, t. XV (1867)], l'auteur a cherché à obtenir comme résidus des produits utilisables dans l'industrie, en remplacement du sulfate de zinc, qui est absolument sans valeur.

Le métal négatif est un cylindre de plomb entouré d'acide oxalique; le pôle positif est formé par une plaque de charbon plongeant dans une solution de salpêtre dans l'acide azotique.

Digitized by Google

Les meilleures proportions sont :

10gr d'acide azotique pour 126gr d'eau,
10gr de salpêtre pur pour 30gr d'acide azotique.

Par suite de l'attaque du plomb, il se dépose au fond du vase un mélange d'oxalate, de carbonate et d'hydrate de plomb, qui est utilisable comme blanc de plomb si l'on a la précaution de le faire séjourner quelques jours dans de l'eau de chaux que l'on renouvelle de temps en temps. Ce séjour enlève l'acidité du produit, ce qui l'empêche d'oxyder l'huile et, en même temps, le fait gagner en opacité et en blancheur.

D'après Balsamo, la pile fonctionne encore mieux si l'on a soin de ne mettre au fond du vase qu'une couche de 0m,01 ou 0m,02 de hauteur d'acide oxalique, que l'on peut même remplacer par du chlorate de potasse, et de remplir tout le reste d'essence de térébenthine. On recouvre également d'essence le liquide nitreux. Cette pile ainsi modifiée a donné un courant assez intense et peu variable pendant vingt-deux jours. Du reste, d'après l'auteur, toutes les piles Bunsen gagnent lorsqu'on recouvre l'acide azotique d'essence de térébenthine; le dégagement de vapeurs nitreuses est presque complètement supprimé, et il se forme des essences diverses, essence de girofle, camphre de Bornéo, etc.

§ IV. — Piles dérivant de celle de Grove avec un métal positif autre que le platine.

La substitution du fer passif au platine dans l'élément de Grove paraît avoir été indiquée d'abord par Hawkins [*Philosophical Magazine*, t. XVI (1840)], puis étudiée avec soin par Olfers [*l'Institut*, t. IX (1841)]. On peut remplacer le platine par du fer, à condition d'employer de l'acide azotique concentré, dans lequel le fer devient passif et fortement électronégatif. En employant des couples identiques, mais avec des lames de platine, de fonte, d'acier ou de fer, l'auteur a obtenu

Digitized by Google

les nombres suivants :

	Résistance.	Force électro-motrice.
Platine	100,00	100,00
Fonte	98,39	89,62
Acier	98,54	86,99
Fer	85,97	78,68

La fonte serait donc excellente pour remplacer le platine; mais l'avantage apparent est compensé par le prix de revient de l'acide azotique, qui doit être beaucoup plus concentré qu'avec le platine.

Peu de temps après, Schönbein [*Archives de l'électricité*, t. II (1842)] indiquait la même modification. Comme l'un des principaux inconvénients de l'emploi du fer résulte du haut degré de concentration auquel doit toujours être l'acide azotique si l'on veut éviter la dissolution du fer, Schönbein propose d'employer un mélange de 2 parties d'acide azotique ordinaire pour 1 d'acide sulfurique; ce dernier a pour objet de retenir l'eau formée par l'oxydation de l'hydrogène, et par suite d'empêcher la dilution de l'acide azotique. Mais la présence de l'acide sulfurique ne suffit pas pour empêcher à la longue la dissolution au moins partielle du fer; il se produit alors à la surface de ce dernier des dépôts de sels peu solubles, qui mettent la pile hors d'usage.

La pile Kukla est formée de zinc plongeant dans de l'eau salée et d'antimoine dans de l'acide azotique contenant un peu de bioxyde de manganèse. D'après Kukla et Bœttger, cette pile présenterait cet avantage que l'antimoine serait le corps le plus électro-positif des métaux usuels; mais des expériences plus complètes ont montré que cette opinion est erronée, et que l'antimoine doit passer après le charbon. Cette modification de la pile de Bunsen n'a donc pas grande raison d'être.

§ V. — Piles dérivant des types de Grove et de Bunsen avec un liquide dépolarisant autre que l'acide azotique.

On a cherché à remplacer dans les piles de Grove ou de Bunsen l'acide azotique successivement par un grand nombre

Digitized by Google

de liquides, afin d'éviter le dégagement des vapeurs nitreuses. Nous réunissons ici quelques-uns de ces essais, qui n'ont pas donné naissance à de nouvelles formes de piles. Quand on veut essayer ou juger un nouveau liquide, il faut voir d'abord :

1° S'il empêche la polarisation ;

2° Quelle quantité d'oxygène il peut fournir à l'hydrogène dégagé, par rapport à un égal volume d'acide azotique ;

3° Quel est le rapport de la force électro-motrice et de la résistance qu'il donne à celles que donne l'acide azotique.

Parmi les nombreux liquides qui ont été successivement essayés, nous citerons les suivants :

Une dissolution de chromate de potasse, de chlorate de potasse, ou un mélange de bioxyde de manganèse et de sel de cuisine, proposés respectivement par Bunsen [*Poggendorff's Annalen*, t. LIX (1843)], Leeson [*Philosophical Magazine*, t. XX] et Warrington [*Philosophical Magazine* (1842)].

Ces trois liquides ne détruisent pas suffisamment la polarisation.

Il vaut mieux employer une dissolution d'acide chromique, ou, ce qui revient au même, un mélange proposé par Buff et composé de 3 parties de bichromate de potasse, 4 d'acide sulfurique et 18 d'eau. L'acide sulfurique se trouve, dans ce mélange, en quantité suffisante pour former de l'alun de chrome avec la potasse et le sesquioxyde de chrome provenant de la réduction du bichromate. Nous avons déjà parlé des piles à bichromate à propos des piles à un liquide, et nous y reviendrons encore plus loin avec détails.

La substitution de l'acide chromique à l'acide azotique dans la pile de Grove diminue sa force électro-motrice des deux tiers et augmente sa résistance des six cinquièmes. Dans la pile de Bunsen, au contraire, la force électro-motrice s'accroît dans le rapport de 100 à 102,5 (Poggendorff) ou de 100 à 109 (Buff) ; mais la résistance augmente beaucoup, et quelquefois de moitié. Cette augmentation générale de résistance tient probablement à ce qu'il se dépose de l'oxyde de chrome dans l'intérieur du vase poreux. Enfin, un autre point à consi-

Digitized by Google

dérer pour déconseiller l'emploi de l'acide chromique, outre son prix élevé, c'est qu'à volume égal sa dissolution donne sept fois moins d'oxygène que l'acide azotique. On ne peut donc jamais arriver, avec l'acide chromique, à une dépolarisation complète pendant un temps notable.

M. Félix Le Blanc [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXIII (1871)] a constaté que l'acide chlorique, en dissolution même étendue, donnait de bons résultats. Il en est de même de l'eau régale.

On a proposé également l'emploi des azotates de potasse, de soude ou d'ammoniaque. Seuls, ils ne détruisent pas la polarisation. Ils valent un peu mieux quand on les mélange avec les acides sulfurique ou chlorhydrique, sans cependant absorber tout l'hydrogène. Avec l'acide chlorhydrique, on peut remplacer le charbon par une lame de cuivre platinée, obtenue en plongeant une lame de cuivre dans une dissolution faiblement acide de chlorure de platine; cette lame facilite le dégagement de l'hydrogène qui n'aurait pas été absorbé.

Nous ne pouvons que mentionner les essais de M. Dering (azotate de potasse et acide sulfurique anhydre), de M. Tabarié (azotate de soude et acide sulfurique ordinaire), qui ne paraissent pas avoir fourni de résultats importants.

Guignet [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXXVII (1853)] propose de remplacer l'acide azotique, dans la pile de Bunsen, soit par les sels de peroxyde de fer, soit plutôt par un mélange d'acide sulfurique et de bioxyde de manganèse, qui ne dégage pas d'oxygène à la température ordinaire, mais absorbe bien l'hydrogène naissant.

On peut employer pour cet usage l'acide sulfurique, tel qu'il sort des chambres de plomb ou même plus étendu; le bioxyde est en poudre grossière et peut être mis en excès sans inconvénient.

L'auteur a trouvé que le courant de cette pile était absolument identique à celui d'un couple de Bunsen ordinaire, en les faisant agir tous deux soit sur une aiguille aimantée, soit dans un voltamètre.

Digitized by Google

Il est probable que les charbons dont se servait Guignet étaient vieux et imprégnés d'acide azotique, car, en essayant de construire d'après son système une pile avec des charbons neufs, M. Le Roux [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXXVII (1853)] n'a obtenu qu'une force électromotrice bien inférieure à celle de l'élément Bunsen, et a constaté qu'au bout d'un quart d'heure le mélange avait perdu toute efficacité pour absorber l'hydrogène.

Le mélange d'acide sulfurique et de bioxyde de manganèse ne dépolarise pas sensiblement aux températures ordinaires; pour lui permettre d'absorber l'hydrogène, il faut le chauffer, comme l'a montré M. Le Roux, et il ne devient réellement efficace que vers 70° ou 80°, température à laquelle il commence à dégager de l'oxygène.

M. Le Roux [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XXXVII (1853); *Philosophical Magazine*, 4e série, t. VI] remplace, dans la pile Bunsen, l'acide azotique par un mélange de bioxyde de manganèse et d'acide chlorhydrique. Il dit obtenir un courant aussi fort qu'avec l'acide azotique ordinaire, et dont l'intensité est maximum quand la température du mélange est élevée jusque vers 35°.

En mêlant simplement l'acide et le bioxyde de manganèse, on obtient un courant qui s'affaiblit rapidement et presque de moitié, parce que le bioxyde tombe au fond du vase. Le courant, au contraire, reste aussi constant qu'avec la pile Bunsen ordinaire si l'on a soin de renouveler l'acide au contact du bioxyde de manganèse, soit en agitant les charbons, soit en se servant de diaphragmes très larges et peu profonds.

Il faut, avec cette modification, se servir d'acide chlorhydrique pour aciduler l'eau dans laquelle plonge le zinc. Si l'on se servait d'acide sulfurique, celui-ci, passant partiellement dans le vase poreux, y serait réduit et donnerait soit un dépôt de soufre, soit un dégagement d'acide sulfhydrique.

Dans la pile Wilson [*la Lumière électrique*, p. 178 (1880)], les bocaux ont une forme particulière. A l'intérieur, ils sont divisés jusqu'à mi-hauteur en deux compartiments concentriques

Digitized by Google

par un cylindre de même matière qui fait corps avec eux. Dans le compartiment central se trouve un vase poreux de même hauteur que le bocal. Dans le vase extérieur est l'électrode négative, du charbon enveloppé d'une pâte de bioxyde de manganèse. Le cylindre creux en zinc repose sur la paroi qui divise les deux compartiments; il ne remplit donc que la moitié supérieure de l'élément. Les liquides de cet élément sont restés secrets. La force électro-motrice serait de 2 volts et la résistance moindre que 1 ohm; il paraîtrait enfin que cet élément serait plus constant que celui à bichromate de potasse.

La pile Howell [*Telegraphic Journal* (1879); *la Lumière électrique* p. 235 (1879)] se compose d'un vase poreux intérieur contenant le zinc, une solution de sulfhydrate d'ammoniaque et quelques gouttes de mercure, pour maintenir le zinc amalgamé. Ce vase poreux est placé dans un vase de grès percé de trous en très grand nombre, et dans l'espace annulaire compris entre les deux vases on tasse le mélange de charbon et de bioxyde de manganèse. Enfin on place le tout dans un troisième vase de grès contenant de l'eau acidulée d'acide sulfurique.

Suivant l'auteur, le zinc ne serait pas plus attaqué que dans l'élément Leclanché ordinaire, quand le circuit est ouvert; de plus la résistance du nouveau couple serait moindre et son énergie plus grande.

Buff [*Philosophical Magazine*, 4e série, t. IX (1855)] propose de remplacer l'acide azotique de la pile Bunsen par du perchlorure de fer, en ayant soin d'y ajouter un peu d'acide chlorhydrique. On emploie alors de l'eau salée autour du zinc. On obtient ainsi un élément à peu près constant, inférieur à l'élément Bunsen, mais supérieur, comme force électro-motrice, à la pile Daniell et qui ne le céderait en rien à cette dernière comme constance.

Dans la pile Daniell, le sulfate de cuivre qui traverse le vase poreux donne sur le zinc un dépôt de cuivre, et, par suite, une pile locale qui consomme inutilement le zinc. Avec le perchlorure de fer on n'a plus cet inconvénient à craindre, car non

Digitized by Google

seulement il n'est pas réduit par le zinc à l'état de fer métallique, mais il peut même dissoudre le zinc.

La force électro-motrice de l'élément Bunsen étant représentée par 182 et celle de l'élément Daniell par 112, celle de la pile Buff, à eau salée et perchlorure de fer additionné d'un peu d'acide chlorhydrique, serait 139.

Gérardin [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXII (1866)], ayant besoin d'une pile économique de faible résistance et de grande force électro-motrice, emploie la disposition suivante.

Il remplace la lame de zinc par des copeaux de fer ou de fonte; une lame de fer enfoncée au milieu de ces copeaux sert de rhéophore; le tout plonge dans l'eau pure.

Dans le vase poreux, on met une dissolution de perchlorure de fer additionnée d'eau régale; comme électrode positive, on prend une lame formée de charbon de cornue pulvérisé et aggloméré avec de la paraffine, suivant le procédé Carlier.

On peut donner à cette pile de très grandes dimensions et obtenir ainsi beaucoup d'électricité à un prix extrêmement minime.

Duchemin [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXX (1870)] emploie de même comme pile marine une pile à perchlorure de fer.

Elle se compose d'un cylindre de zinc épais ouvert aux deux bouts et dans l'axe duquel est un vase poreux fixé à un flotteur au moyen d'une traverse de bois (*fig.* 94). Ce vase est convenablement fermé et contient un charbon de cornue entouré de débris de coke pulvérisés et de perchlorure de fer.

Le tout est plongé au-dessous d'une bouée dans la mer. Cette pile donne un courant assez intense et de longue durée. Elle peut être employée à actionner une sonnerie électrique puissante placée dans la bouée, et destinée à en indiquer la présence aux navires la nuit ou par les temps de brouillard.

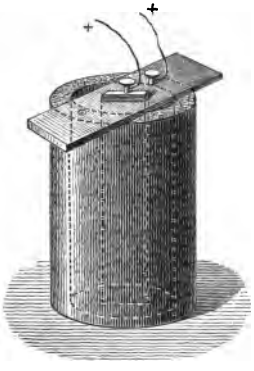
Renoux et Salleron [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLVIII (1859)] ont proposé de remplacer l'acide azotique de la pile de Bunsen par une dissolution de

Digitized by Google

chlorate de potasse dans de l'eau acidulée d'un tiers à un sixième d'acide sulfurique. On obtient ainsi une pile bien constante et dont la puissance est intermédiaire entre celles des éléments Bunsen et Daniell.

Le chlorate de potasse semble *a priori* plus avantageux que le sulfate de cuivre, car, s'il coûte trois fois plus cher, il neu-

Fig. 94.



tralise une quantité six fois plus grande d'hydrogène. Resterait à savoir si le courant de cette pile est réellement aussi constant que celui de la pile Daniell.

En 1862, M. Vergnes a employé dans la même pile un mélange de chlorate de potasse, de bichromate de potasse et d'acide sulfurique manganésé. On aurait une pile supérieure à celle de Grove [*Annales télégraphiques*, t. V, p. 190].

La pile Marié-Davy [*Cosmos*, t. XV (1859)] n'est autre qu'une pile Bunsen dans laquelle on remplace l'acide azotique par une pâte de sulfate de protoxyde de mercure (Hg^2O, SO^3), tassée autour du charbon.

Ici il n'y a pas à craindre, comme dans la pile Daniell, le passage du liquide intérieur dans le vase extérieur. En effet, le sulfate de protoxyde de mercure est fort peu soluble, et, s'il contenait des sels solubles de mercure pouvant passer dans le vase extérieur, ils ne pourraient qu'être utiles en assurant d'une manière plus efficace l'amalgamation du zinc.

Digitized by Google

38 éléments de cette pile, sur un fil télégraphique à service permanent de jour et de nuit, ont produit la même intensité de courant que 60 éléments Daniell et, sans aucun entretien, ont fait fonctionner les appareils pendant cinq mois et vingt-trois jours [Bergon, *Annales télégraphiques*]. Leurs dimensions étaient cependant plus faibles que celles des éléments Daniell, qui n'ont pu durer que deux mois et vingt-trois jours, dans les mêmes circonstances. Les vases en verre de ces éléments nouveaux avaient $0^m,08$ de hauteur sur $0^m,07$ de diamètre; les zincs avaient $0^m,065$ sur $0^m,055$ et les vases poreux $0^m,07$ sur $0^m,035$ de diamètre.

Quand la pile a cessé de fonctionner, les résidus, qui se composent en grande partie de mercure, traités convenablement par l'acide sulfurique, donnent à nouveau du sulfate.

La force électro-motrice du nouveau couple est de 220, celle de l'élément Grove étant 310 et celle de Daniell 175 (J. Regnauld). Ce nombre correspond à $1^{volt},20$.

Cette pile présente donc des avantages de toutes sortes sur la pile Daniell : entretien nul tant qu'il reste du sulfate de mercuré à réduire, grande propreté, matériaux dépensés entièrement avec utilité, effets constants de plus longue durée, résistance égale et force électro-motrice plus considérable, ce qui permet d'employer moins de couples pour produire le même effet, conservation indéfinie du vase poreux, etc.

Le prix de revient, un peu supérieur, est amplement compensé par un plus long service des matières employées, par des produits qui peuvent être recueillis et rentrer en usage, et enfin par la diminution du nombre des éléments nécessaires.

Le seul inconvénient est le suivant : pour que la pile fonctionne bien, il faut qu'il y ait du sulfate dissous; or ce sel est presque insoluble, de sorte que, une fois que la dissolution a été épuisée, il faut quelque temps pour qu'elle se reforme. La pile ne peut donc fonctionner d'une manière constante que pour des courants peu intenses. Si l'on veut un courant fort, il doit être de courte durée et intermittent. Cet inconvénient devient presque nul dans l'application des piles Marié-Davy aux sonne-

Digitized by Google

ries et au service des lignes télégraphiques, surtout dans les lignes longues et résistantes.

Il est bon également d'employer des vases très poreux, ce qui diminue la résistance intérieure des éléments.

Dans les lignes télégraphiques peu chargées, la pile Marié-Davy est très avantageuse et est, en effet, fréquemment employée.

M. Marié-Davy a indiqué aussi l'emploi du sulfate de peroxyde de mercure (HgO, SO^3). Ce dernier, étant soluble, donne plus longtemps des courants énergiques et constants que le sulfate de protoxyde; mais, aussi, il s'épuise plus rapidement. Ce sel se partage en un sel acide qui se dissout et en sulfate tribasique (turbith minéral) qui se précipite. Le sel acide ne cède qu'une partie de son acide au zinc; le surplus redissout le sel basique au fur et à mesure des besoins; la réaction est donc plus compliquée, mais ne présente pas d'inconvénients.

La pile à sulfate de peroxyde est employée par le Dr Benoît pour son appareil électro-médical. Elle convient donc bien pour les courants d'induction et serait probablement très bonne également pour la galvanoplastie et la dorure. Les deux sels donnent, du reste, à peu près la même force électro-motrice.

Sur les lignes télégraphiques, c'est le sulfate de protoxyde (Hg^2O, SO^3) qui sert exclusivement, à cause de sa longue durée.

La pile hermétique de Grenet [*Cosmos*, t. XXIII (1863); *Fortschritte* (1863)] n'est qu'une modification de la pile Marié-Davy, consistant surtout dans la suppression du vase poreux et de même nature que la pile Callaud par rapport à la pile Daniell. Le vase, de verre, est fermé par un bouchon percé de deux trous par lesquels passent une baguette de charbon des cornues et un cylindre massif de zinc. Au fond on place du sulfate de protoxyde de mercure (Hg^2O, SO^3) dans lequel s'enfonce la baguette de charbon, et on remplit le vase d'eau pure, ce que l'on fait sans enlever le bouchon, en retirant simplement le zinc, qui est mobile, puis le réinstallant exactement. Le zinc ne doit pas descendre assez bas pour pénétrer dans le sulfate de mercure.

Digitized by Google

L'appareil doit alors être maintenu immobile; il s'y forme deux couches liquides : l'inférieure, formée par la dissolution de sulfate de mercure, agit comme liquide dépolarisant, la couche supérieure n'étant presque que de l'eau pure, acidulée par l'acide provenant de la réduction du sulfate de mercure.

Grenet a surtout appliqué cette pile au jeu des sonneries électriques. Il emploie deux modèles : le premier exige 500gr d'eau et 100gr de sulfate de protoxyde de mercure; le second n'a besoin que de 100gr d'eau et de 30gr de sel.

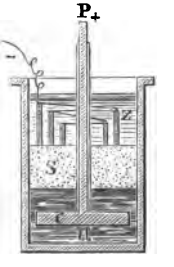
Le service d'une grande administration exige six des grands couples, celui d'un hôtel six des petits. Dans la pratique on peut admettre que la pile fonctionne six mois sans réparation ni aucun entretien.

D'après Van den Eynde, on obtient un élément qui fonctionne pendant plusieurs mois sans démontage, en tassant du sulfate d'alumine concassé autour du charbon dans le vase poreux et plongeant le zinc dans l'eau salée.

Pérémé a proposé de remplacer, dans les piles Marié-Davy, le sulfate de mercure par du sulfate d'antimoine; mais, d'après les expériences de M. du Moncel, cette substitution n'est pas avantageuse, car elle diminue la force électro-motrice de la pile et en accroît la résistance.

José de Menna Apparicio, officier de marine portugais [*les*

Fig. 95.



Mondes, t. VII (1865)] a imaginé de donner aux substances de la pile Marié-Davy la disposition de la pile Minotto (*fig.* 95).

Digitized by Google

La pile est formée de petits bocaux de verre de $0^m,07$ de haut sur $0^m,05$ de diamètre; au fond on met une couche H de sulfate de mercure (HgO, SO^3), à raison de 50^{gr} de sulfate par élément.

Au milieu de cette couche est disposée horizontalement une plaque carrée de charbon C, de $0^m,02$ de côté et de $0^m,005$ d'épaisseur. Cette plaque est percée en son centre d'un trou dans lequel s'enfonce à frottement dur une baguette carrée de charbon P, de $0^m,08$ de haut et de $0^m,01$ de côté, et enduite de cire sur toute sa hauteur de manière à être isolée complètement.

Au-dessus du sulfate de mercure est une couche S de $0^m,012$ de haut, formée de sable dont les grains ne doivent pas avoir moins de $\frac{1}{3}$ de millimètre de diamètre. Enfin, sur le sable repose une spirale de zinc Z, de 100^{cq} de surface, formée par une lame de $\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur, $0^m,011$ de hauteur et $0^m,45$ de longueur. Comme dans la pile Minotto, le zinc est soudé à un fil de cuivre replié en spirale qui permet au zinc de descendre au fur et à mesure de l'usure du sulfate de mercure. Enfin, au moyen de ce fil de cuivre, on fait communiquer le charbon d'un élément avec le zinc du suivant; pour cela il suffit de serrer l'une contre l'autre au moyen d'une pince de laiton les extrémités du fil de cuivre et de la baguette de charbon, après avoir eu soin d'interposer entre la pince et le charbon une lame de zinc, pour que la vis de pression ne brise pas le charbon. Pour faire fonctionner la pile, on verse de l'eau sur le tout au moins de manière à recouvrir complètement le zinc.

On a essayé une pile formée de 20 de ces petits éléments (montés avec 50^{gr} de sulfate de mercure par élément); elle transmettait facilement des dépêches dans un appareil Morse, avec une résistance extérieure de 500^{km} en bobines. De plus, cette pile est très constante, économique, et ne demande pas d'entretien.

Parmi les piles à sulfate de mercure, il faut encore signaler la pile étalon proposée par Latimer Clark [*Proceedings of the royal Society*, t. XX (1872); *Philosophical transac-*

Digitized by Google

tions (1873)] et composée des éléments suivants : mercure-sulfate de mercure, sulfate de zinc-zinc.

Le sulfate de mercure (Hg^3OSO^3) est préparé en dissolvant du mercure pur en excès dans de l'acide sulfurique chauffé au-dessous de son point d'ébullition. On obtient ainsi une poudre blanche presque insoluble, qu'on lave à l'eau distillée; l'addition de l'eau ne doit pas donner une liqueur jaune, qui indiquerait la présence du sulfate de peroxyde de mercure.

Le sulfate de mercure blanc est délayé en pâte épaisse avec une dissolution saturée de sulfate de zinc; on fait bouillir le tout, pour chasser l'air, puis on verse la pâte sur le mercure, que l'on a mis préalablement dans un vase de pile et qui a été chauffé. Un morceau de zinc distillé est alors suspendu dans la pâte, et le vase est scellé à la paraffine. Le rhéophore positif est formé d'un fil de platine qui descend jusque dans le mercure par un tube de verre collé dans l'intérieur du vase; il vaut encore mieux employer un petit tube de verre extérieur appliqué contre le vase et qui débouche tout près du fond, dans le mercure.

La force électro-motrice des couples ainsi formés est remarquablement uniforme d'un couple à l'autre, et parfaitement constante si l'on a soin de ne pas les faire travailler en court circuit et de ne laisser leur circuit fermé que très peu de temps. Aussi ces piles ne peuvent-elles être utilisées dans l'industrie; mais elles sont tout à fait propres à servir d'étalons pour déterminer, par comparaison, la force électro-motrice des autres piles.

La variation de l'élément Latimer Clark avec la température est également assez uniforme; elle décroît avec la température d'environ 6 pour 10000 pour 1° C. Toutefois, les variations sont plus marquées près de 0°; elles atteignent alors 8 pour 10000; elles sont sensiblement de 6 pour 10000 aux températures ordinaires, entre 5° et 25°, et descendent à 5,5 pour 10000 vers 100°.

La force électro-motrice moyenne de cet élément a été déterminée avec le plus grand soin en unités absolues. A la tem-

Digitized by Google

pérature de 15°,5, on a trouvé

	volt
Par l'électro-dynamomètre (18 observations).....	1,4574
Par la boussole des sinus (15 observations).....	1,4562
Moyenne.....	1,4568

Comme on ne peut garantir le quatrième chiffre décimal, on voit que la force électro-motrice de l'élément Latimer Clark est exactement 1^{volt},457 à la température de 15°.

Pour évaluer la force électro-motrice d'une pile, on la compare à une autre pile de force électro-motrice connue au préalable. L'élément Latimer Clark est celui qui convient le mieux pour ces comparaisons, car la force électro-motrice des piles les plus constantes, celle de Daniell par exemple, varie dans des proportions notables suivant le degré de concentration des dissolutions qui y entrent.

Pour éviter le dégagement de vapeurs nitreuses de la pile Bunsen, Duchemin [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LX (1865); *les Mondes*, t. VII et VIII (1865)] y remplace l'acide azotique par une dissolution de sesquichlorure de fer qui est réduit par l'hydrogène, en donnant du protochlorure et de l'acide chlorhydrique qui reste dissous. De la sorte, la polarisation est aussi bien détruite que dans la pile Bunsen, sans qu'il y ait, cette fois, aucun dégagement gazeux.

Aussi la pile Duchemin a-t-elle été vite adoptée dans l'industrie, notamment dans les ateliers Oudry, où elle sert pour la dorure galvanique.

On peut, en sacrifiant un peu de la force, y remplacer l'eau acidulée sulfurique par une dissolution de sel marin. Enfin, en ne mettant autour du zinc que de l'eau pure ou une dissolution de sulfate de fer, la pile devient assez constante pour être employée en télégraphie.

Quand la pile a fonctionné très longtemps et que les sels de fer au maximum ont été ramenés au minimum, il suffit, pour remettre la pile en état, de faire passer un courant de chlore

Digitized by Google

dans la dissolution des sels de fer, ou, ce qui est plus commode et moins coûteux, de les faire bouillir avec quelques gouttes d'acide azotique. Cet acide oxyde l'hydrogène de l'acide chlorhydrique formé et met en liberté le chlore, qui transforme de nouveau le protochlorure de fer en sesquichlorure. Les liquides peuvent donc, de la sorte, servir presque indéfiniment.

La pile Duchemin a une force électro-motrice un peu moindre et une résistance beaucoup plus grande que la pile de Bunsen. En comparant deux éléments de mêmes dimensions, M. du Moncel [*Carl Repertorium*, t. I] a trouvé, pour la pile Bunsen, une force électro-motrice de 11,123 et une résistance de 153^m, et, pour la pile Duchemin à eau salée, une force électromotrice de 9,640 et une résistance de 942^m. Pour la pile Duchemin à eau acidulée, les différences seraient un peu moins accusées.

Eccher [*Poggendorff's Annalen*, t. CXXIX (1866)] indique aussi la grande résistance de la pile Duchemin, ce qui fait que, pour les télégraphes, elle ne serait bonne que dans les lignes très longues et très résistantes.

Guérin [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXII (1866)] dispose en colonne et de la manière suivante la pile à sulfate de mercure ou à sulfate de plomb.

On empile une série de disques de zinc, de terre poreuse et de charbon; le centre des rondelles de zinc et de charbon est évidé. Pour la pile à sulfate de mercure, on imprègne les plaques poreuses de la dissolution saline, et l'on place, en outre, une petite quantité de sel dans la cavité formée par le zinc ou le charbon; la pile est contenue dans un manchon et surmontée d'un vase poreux qui est chargé avec la même solution.

Quant au sulfate de plomb, on se contente de le déposer dans les cavités du zinc, et l'on fait arriver l'eau du vase poreux.

Roullion [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXIII (1866)], ayant remarqué qu'une eau régale riche en acide chlorhydrique n'attaque l'argent que très su-

Digitized by Google

perficiellement, parce que la couche de chlorure insoluble formé protège les parties sous-jacentes, est parti de là pour proposer une nouvelle pile. Le vase extérieur contient un cylindre de zinc amalgamé et de l'eau acidulée sulfurique. Dans le vase poreux, rempli d'eau régale riche en acide chlorhydrique, plonge une lame d'argent pur.

Cette pile a très bien fonctionné pendant plusieurs mois et, employée à la galvanoplastie, a donné des médailles d'un cuivre très dur, très cohérent et de la meilleure qualité.

L'argent, après plusieurs mois de séjour dans l'eau régale, n'avait pas sensiblement diminué, et le vase poreux ne contenait pas trace de chlorure d'argent. Cette pile a paru à l'auteur moins turbulente que la pile Bunsen, peut-être un peu moins forte, mais plus constante.

Dans la pile Reinch, le vase poreux est rempli de coke tassé que l'on imbibe d'eau régale; dès qu'on n'a plus besoin de la pile, il suffit d'enlever le vase poreux. Cette disposition permet de réduire les dimensions des récipients, et, de plus, comme le chlorure de zinc formé est très soluble, on n'a plus à redouter la formation de cristaux sur les lames de zinc. De plus, M. Le Blanc [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXIII, p. 906] a reconnu que l'eau régale est en effet avantageuse à employer dans les piles et donne un courant énergique.

Duchemin [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXIV (1867)] propose de remplacer l'acide azotique de l'élément Bunsen par une solution aqueuse d'acide picrique additionnée d'un peu d'acide sulfurique. On obtient ainsi une pile utilisable pour les sonneries électriques et la transmission des dépêches.

On peut encore se servir de cette solution d'acide picrique additionnée d'acide sulfurique dans les piles zinc-charbon à un seul liquide.

Savary [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVI (1868)] conserve dans la pile Bunsen le zinc plongeant dans l'eau salée; mais, dans le vase poreux, il

Digitized by Google

met un charbon entouré de quelques tours de fil de cuivre et plongeant dans de l'eau salée qui tient en suspension de la fleur de soufre. Il prétend que ce couple est bien constant et presque aussi intense que le couple Daniell.

La pile universelle de Delaurier [*les Mondes*, t. XXII (1870)] n'est autre qu'une pile de Bunsen dans laquelle l'acide azotique est remplacé par un mélange de :

Acide chromique (4^{eq})	25,14	parties.
Sulfate de peroxyde de fer (1^{eq})	25,00	»
Acide sulfurique anglais	30,62	»
Eau	60,00	»

Ce liquide absorbe complètement l'hydrogène dégagé dans la pile, en se transformant lui-même en un mélange de sulfate de protoxyde de fer et de sulfate de sesquioxyde de chrome.

Les formules qui expliquent ces deux réactions sont les suivantes,

$$4CrO^3 + 6(SO^3, HO) + 6H = 2[(Cr^2O^3), 3SO^3] + 12HO,$$
$$Fe^2O^3, 3SO^3 + H = 2(FeO, SO^3) + SO^3, HO,$$

de sorte que la formule totale de la réaction serait

$$4CrO^3 + Fe^2O^3, 3SO^3 + 5(SO^3, HO) + 7H$$
$$= 2(Cr^2O^3, 3SO^3) + 2(FeO, SO^3) + 12HO.$$

Le mélange est préparé par Delaurier dans des conditions telles, qu'il peut rivaliser de prix avec l'acide azotique; plus tard même, Delaurier espère pouvoir reprendre les liquides épuisés pour les revivifier, et alors la pile serait réellement très économique.

Pour produire de la lumière électrique, on emploie, dans le vase extérieur, de l'acide sulfurique étendu et du zinc amalgamé. Dans la plupart des autres cas, notamment pour la dorure galvanique, on se contente de zinc ordinaire et d'eau salée au dixième : de la sorte, l'usure du zinc est nulle quand le circuit est ouvert; de plus, on évite ainsi l'amalgamation du

Digitized by Google

zinc, opération coûteuse et redoutable pour les doreurs, à cause des taches que le mercure occasionne sur les pièces.

Cette pile est actuellement employée pour produire la dorure galvanique, pour animer les moteurs des machines à coudre, les orgues électriques, pour exciter les bobines d'induction associées aux moteurs Lenoir, etc.

Si on veut l'employer pour les sonneries et horloges électriques et les télégraphes, on remplace l'eau salée au dixième par de l'eau saturée de sel marin (en contenant environ 30 pour 100), ce qui diminue l'endosmose des liquides et rend la pile plus constante. On peut encore, pour le même usage, augmenter la constance et la durée de la pile en vernissant presque tout le vase poreux, à l'exception d'une portion de surface de dimensions arbitraires, mais qu'on peut réduire à $0^m,10$ de haut sur $0^m,015$ de large : cela diminue encore la consommation des liquides.

L'une des modifications les plus usitées de la pile Bunsen est celle qui consiste à y remplacer l'acide azotique par la dissolution de bichromate de potasse dont nous avons déjà indiqué l'emploi à propos des piles à un liquide (p. 153).

Dans le modèle ordinaire, on prend comme liquide dépolarisant un mélange de 100 parties d'eau, 25 d'acide sulfurique et 12 de bichromate; le zinc amalgamé, extérieur au vase poreux, plonge dans de l'eau acidulée de $\frac{1}{12}$ d'acide sulfurique.

D'après Latimer Clark et R. Sabine, la force électro-motrice de cette pile serait de $2^{volts},028$ dans les premiers instants qui suivent la fermeture du circuit. Cette force électro-motrice serait ainsi supérieure à celle de toutes les piles connues ; mais elle diminue rapidement, surtout quand la pile fonctionne en court circuit. Poggendorff, qui a le premier employé les piles à bichromate, plongeait le zinc dans de l'eau acidulée sulfurique. M. Le Goarant de Tromelin a montré que l'on obtenait de meilleurs effets en remplaçant l'eau acidulée par une solution de chlorhydrate d'ammoniaque; l'intensité est plus grande, et l'usure du zinc se fait régulièrement et sans effervescence.

On désigne en Angleterre sous le nom de *pile Fuller* une pile

Digitized by Google

à bichromate où le zinc est intérieur. Le charbon a la forme d'une lame de $0^m,05$ de largeur et est placé dans le vase extérieur. Comme il faut que le zinc soit bien amalgamé, par surcroît de précaution on verse du mercure en excès au fond du vase poreux. Cette pile semble donner de bons résultats pour la télégraphie; elle est moins résistante qu'une pile Daniell de mêmes dimensions et a une force électro-motrice double. Ces deux qualités réunies permettent de l'employer avec beaucoup d'avantages dans le système de groupement de piles très usité maintenant en télégraphie, et où une même pile est commune à plusieurs circuits. Ce système exige, en effet, des piles peu résistantes et douées d'une grande force électromotrice.

Cet avantage semble disparaître complètement dans d'autres applications; dans des expériences faites pour la production de lumière [*La Lumière électrique*, p. 112 (1879)], c'est la pile à bichromate qui a donné, de toutes les piles essayées, la plus forte dépense à l'heure pour une même quantité de lumière produite.

Nous avons vu (p. 155, 161) que la pile à bichromate gagne beaucoup par l'agitation des liquides. M. Camacho a appliqué heureusement cette propriété dans la pile à bichromate à deux liquides. Les éléments ont la forme et les dimensions des piles Bunsen rectangulaires, et dans le vase poreux est une lame de charbon autour de laquelle on a tassé des morceaux de charbon de cornue; les éléments sont disposés en étages, comme sur les marches d'un escalier, et un tube de caoutchouc part du fond d'un vase poreux pour arriver en haut du vase poreux immédiatement inférieur. Ces tubes forment siphons, et la dissolution de bichromate, qui coule d'une manière continue d'un réservoir dans le premier vase poreux, circule dans tous les vases suivants et est recueillie au bas de la pile. On n'a plus qu'à reporter de temps en temps dans le réservoir supérieur la dissolution qui est parvenue en bas. Cette disposition paraît plus facile à réaliser que celle de la pile Chutaux (p. 161).

M. Cloris Baudet [*la Lumière électrique*, p. 197 (1879)] a modifié la disposition de la pile au bichromate de potasse de la

Digitized by Google

manière suivante. Le vase poreux est triple : la partie centrale, qui forme un vase poreux cylindrique ordinaire, contient le zinc et l'eau acidulée; sur les côtés sont deux autres vases poreux beaucoup plus petits, dont l'un est rempli d'acide sulfurique et dont l'autre, percé de trous, contient des cristaux de bichromate. Le tout est plongé dans un vase de grès qui contient la solution bichromatée et le charbon. A mesure que la dissolution s'épuise, les cristaux de bichromate se dissolvent sous l'influence de l'acide sulfurique qui a filtré à travers le vase poreux; la solution dépolarisante se trouve ainsi renouvelée constamment, et l'élément dure plus longtemps que la pile à bichromate ordinaire.

D'après M. Mouton, la force électro-motrice de cette pile serait de 2 volts, et sa résistance de $0^{ohm},22$ au début et de $0^{ohm},3$ après quelque temps de service.

Voulant obtenir comme résidu de la pile un corps susceptible d'être vendu avantageusement, Slater [*la Lumière électrique*, p. 55 (1880)] remplace dans la pile à bichromate de potasse l'électrode de zinc par une électrode de nickel. Cette électrode plonge soit dans de l'eau acidulée sulfurique, soit dans de l'eau salée; il se forme dans le premier cas du sulfate de nickel, et dans le second du chlorure double de sodium et de nickel, substances que l'on peut faire cristalliser ensuite, qui sont très employées dans l'industrie du nickelage et dont le prix est très voisin de celui du nickel lui-même, à égalité de poids.

En employant l'eau acidulée sulfurique, la force électro-motrice de cet élément serait à peu près la même que celle de la pile Bunsen.

Afin d'obtenir des produits purs et de diminuer la polarisation, les deux liquides circulent d'une manière continue. Chacun des deux vases présente une tubulure latérale qui débouche à environ $0^{m},01$ du fond et se termine en haut par un entonnoir dans lequel arrive le liquide; celui-ci s'échappe par un tube de déversement placé à la partie supérieure du vase. On relie ces tubes de déversement aux entonnoirs par un tube de

Digitized by Google

caoutchouc, et, en faisant agir sur les liquides deux pompes mises en mouvement par un moteur électro-magnétique, on entretient une circulation constante dans les éléments. Cette disposition paraît trop compliquée pour rendre jamais de réels services.

Enfin, parmi les meilleures piles à substance dépolarisante autre que l'acide azotique et que l'on ait récemment proposées, il faut citer la pile à chlorure de chaux de M. Niaudet-Breguet [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXIX (1879)].

La pile est construite sur le modèle de l'élément Leclanché à vase poreux. La lame de zinc plonge dans de l'eau salée à 24 pour 100, la lame de charbon qui forme l'électrode positive est placée dans un vase poreux, et l'on tasse autour d'elle des fragments de charbon et de chlorure de chaux. La substance dépolarisante est réellement ici l'acide hypochloreux du chlorure de chaux.

L'auteur a essayé de remplacer l'eau salée par des dissolutions de chlorhydrate d'ammoniaque ou de chlorure de chaux ou par de l'eau acidulée, d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfurique; les résultats ont toujours été moins avantageux.

Au début, la force électro-motrice de cet élément est supérieure à $1^{volt},6$; après plusieurs mois d'abandon, mais à circuit ouvert, elle était encore de $1^{volt},5$. La résistance du modèle ordinaire est d'environ 5 ohms. Comme dans l'élément Leclanché, la dépolarisation est loin d'être complète, et la force électromotrice de polarisation peut atteindre $\frac{1}{3}$ de la force totale; mais la pile reprend très vite, par le repos, sa force électro-motrice primitive. Ainsi un élément, fermé pendant quarante minutes sur une résistance extérieure de 1 ohm seulement, avait perdu 18 pour 100 de sa force électro-motrice; après un repos d'égale durée, il avait regagné 7 pour 100, et il est revenu à son premier état au bout de deux heures.

Pour diminuer l'odeur désagréable de chlore émise par le chlorure de chaux, le vase poreux est fermé par un bouchon recouvert de poix.

Digitized by Google

Le grand avantage de cette disposition, qui lui est commun avec l'élément Leclanché, est qu'il ne se produit aucune usure du zinc tant que le circuit est ouvert. De plus, la pile Niaudet n'emploie que des substances que l'on trouve aisément dans le commerce, et chacun peut aisément le construire; à ce titre, on doit donc en attendre de réels services.

§ VI. — Modifications diverses.

La pile Doat [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLII (1856)] est composée d'un vase de terre ou de verre, contenant au fond une couche de mercure, dans lequel plonge un fil de platine servant de rhéophore négatif, et, au-dessus, une dissolution d'iodure de potassium. Au centre est un vase poreux contenant une dissolution d'iode dans l'iodure de potassium et une baguette de charbon qui sert de rhéophore positif.

Il se forme de l'iodure de mercure, qui se dissout dans l'iodure de potassium, tandis que la potasse mise en liberté va reformer de l'iodure de potassium au contact de l'excès d'iode contenu dans le vase poreux. Toute polarisation est ainsi absolument évitée, de sorte que le courant est bien constant; mais la force électro-motrice est faible : elle n'est, en effet, que le tiers de celle de l'élément Bunsen ou les $\frac{4}{7}$ de l'élément Daniell. Elle augmente un peu quand on ajoute un métal, du zinc par exemple, au mercure.

La résistance intérieure de cette pile est assez faible : pour un élément de 5^{dmq} de section, ayant une couche d'iodure de $0^{m},03$ d'épaisseur, la résistance était égale à celle de $10^{m},5$ de fil de cuivre de $0^{m},001$ de diamètre à 0°.

Les substances employées dans cette pile sont d'un prix élevé; mais il est assez facile de les régénérer à l'aide des résidus. On traite l'iodure de mercure par la potasse caustique, ce qui donne de l'iodure de potassium et de l'oxyde de mercure. Celui-ci, chauffé, revivifie le mercure. Quant à l'iodure de

Digitized by Google

potassium, chauffé avec du bioxyde de manganèse et de l'acide sulfurique étendu d'eau, il dégage l'iode en vapeurs que l'on condense.

J. Regnauld a étudié [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLIII] la pile Doat et toutes les piles qui en dérivent quand on remplace l'iodure de potassium par d'autres iodures, des bromures ou des chlorures.

Voici le résumé de ses recherches :

La force électromotrice de la pile Doat ordinaire est de 102, celle de Daniell étant de 175 et celle de Grove de 310. (L'unité employée par J. Regnauld est la force électro-motrice d'un couple thermo-électrique bismuth-cuivre de 0° à 100°.) En substituant au mercure des métaux plus haut placés dans l'échelle positive, on obtient des piles plus énergiques. On emploie alors soit des amalgames, soit les métaux eux-mêmes, comme avec le zinc et le cadmium.

Ces substitutions ont donné les résultats suivants :

	Force électro-motrice.
Iodure de potassium avec le mercure (pile Doat ordinaire) ..	102
» » cadmium	182
» » zinc.....	216
Amalgame de sodium.....	381
Amalgame de potassium	386

On peut obtenir des piles encore plus énergiques en remplaçant l'iode et l'iodure de potassium par le brome et le bromure, ou le chlore et le chlorure. Les forces électro-motrices de ces éléments sont résumées dans le Tableau suivant :

	Iode et iodure.	Brome et bromure.	Chlore et chlorure.
Mercure.....	102	161	180
Zinc.....	216	280	346
Amalgame de sodium.....	381	465	506
Amalgame de potassium.....	386	471	512

Les actions locales, inévitables avec les amalgames de sodium et de potassium, laissent un peu d'incertitude sur les

Digitized by Google

nombres qui leur sont relatifs. Cependant on peut remarquer sur ces nombres que les forces électro-motrices croissent dans le sens indiqué par la théorie, avec la quantité de chaleur dégagée par les réactions, sans que toutefois le rapport des forces électro-motrices soit absolument le même que celui des quantités de chaleur dégagées.

Toutes ces piles dispendieuses n'offrent d'ailleurs qu'un intérêt purement théorique.

Thomson [*Poggendorff's Annalen*, t. CXI (1860); *Philosophical Magazine*, t. XXI; *Archives générales*, t. IX; *Fortschritte* (1860)] propose, comme modification de la pile de Bunsen, la substitution du cuivre au zinc. La pile est constituée ainsi qu'il suit :

Vase extérieur de terre, contenant l'eau acidulée sulfurique (1 partie d'acide pour 4 d'eau); dans cette eau plonge un cylindre de cuivre. Au centre, vase poreux contenant la lame ordinaire de charbon, qui plonge dans le mélange dépolarisant de Buff et Wœhler (bichromate de potasse et acide sulfurique).

Le cuivre n'est pas attaqué par l'acide sulfurique dans les circonstances ordinaires, de sorte qu'il n'y a plus d'usure possible tant que le circuit est ouvert. De plus, la résistance de la pile est assez faible; mais ces deux avantages ne suffisent pas pour compenser le double inconvénient résultant du prix relativement élevé du cylindre de cuivre et du peu de force de cet élément. Sa force électro-motrice n'est, en effet, que les 0,9 de l'élément Daniell.

La pile Caussinus, employée surtout pour produire des dépôts galvaniques, se compose d'un vase de zinc au fond duquel on fixe un disque de liège, sur lequel repose un second vase beaucoup plus petit, de cuivre ou de plomb, que le liège isole du zinc. On charge l'élément avec une dissolution préparée de la façon suivante.

On mélange 100^{gr} de sel marin, 200^{gr} d'azotate de potasse et 500^{gr} d'eau, puis on chauffe de façon à faire réduire de moitié.

On ajoute alors 200^{gr} d'acide sulfurique, et on chauffe de nouveau de façon à réduire le tout en pâte. On remplit ensuite

Digitized by Google

à moitié le vase de zinc de sel marin, puis on termine le remplissage des deux vases, avec la pâte obtenue précédemment. Il suffit alors d'ajouter un peu d'eau pour mettre la pile en marche. De temps en temps, on ajoute de l'acide sulfurique étendu de moitié d'eau pour entretenir la pile en état.

Enfin nous terminerons ces indications par les piles à consommation de charbon, dans lesquelles, à l'inverse des piles ordinaires, c'est sur le charbon que se forme le pôle négatif.

Ces piles ont été imaginées par M. Becquerel [Becquerel, *Traité d'électricité et de magnétisme* (1855)]; elles se composent d'un creuset de platine rempli de nitrate ou de chlorate de potasse que l'on maintient fondu et dans lequel on plonge une baguette de charbon. Celui-ci est brûlé aux dépens de l'oxygène du bain en fusion, et, si l'on réunit le creuset de platine et le charbon par un fil de métal, on obtient un courant assez intense.

M. Jablochkoff [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXV (1877)] a répété la même expérience sans avoir connaissance des travaux antérieurs de M. Becquerel. Il employait une marmite de fonte dans laquelle il faisait fondre du nitrate de soude naturel; la fonte restait inaltérée, tandis que le charbon brûlait rapidement.

Dans l'état actuel, cette pile n'est pas encore susceptible d'entrer dans la pratique; mais c'est cependant dans une voie analogue que l'on doit chercher pour faire faire aux piles des progrès décisifs. En effet, la chose qui importe le plus maintenant, c'est de remplacer le zinc que l'on consomme d'ordinaire dans les piles par une substance beaucoup plus économique.

§ VII. — Piles a un seul métal.

Nous avons déjà décrit (p. 167) la pile à un seul métal et à deux liquides de Becquerel, qui a été l'origine de toutes les piles à deux liquides. On a fait depuis quelques essais dans la même voie.

Digitized by Google

Wœhler et Weber [*Annalen der Chemie und Pharmacie*, t. XXXVIII (1841)] ont construit une pile à un métal et deux liquides analogue aux piles Becquerel, en prenant deux lames de fer plongeant l'une dans de l'acide sulfurique étendu, l'autre dans de l'acide azotique concentré, où elle devient passive et inattaquable. Cette pile présente des inconvénients de deux sortes : d'abord ceux déjà indiqués, qui sont inhérents à l'emploi du fer passif, comme électrode positive; puis ensuite, en prenant comme métal attaquable le fer au lieu du zinc, on diminue notablement la force électro-motrice. Dans la forme Daniell notamment, la force électro-motrice est diminuée dans le rapport de 0,537 à 1.

Arrott [*l'Institut*, t. XI (1843)] présente une pile à un et deux liquides, analogue à celle de Becquerel et construite de la manière suivante :

Au centre de vases de pile ordinaires on fixe des vases de terre poreuse. De petits cylindres de feuille de platine, de $0^m,15$ de diamètre et de $0^m,36$ de longueur, sont placés dans les vases poreux, que l'on entoure extérieurement de cylindres plus grands de platine en feuille, ayant $0^m,045$ de diamètre sur $0^m,036$ de longueur. Le tout est disposé en série, en réunissant un platine intérieur au platine extérieur du couple suivant. Les liquides employés sont de l'acide azotique à l'intérieur avec du sulfure de potassium à l'extérieur, ou un sel de protoxyde de fer, d'étain ou de manganèse, associés avec un sel de peroxyde du même métal, ou encore les chlorures, sulfures, hyposulfites, hypophosphites alcalins d'un côté, avec les acides chlorique, chromique ou nitrique de l'autre.

La pile Louis-Napoléon (Napoléon III) [*l'Institut*, t. XI (1843)] est analogue à la pile Becquerel et comprend un seul métal et deux liquides. Le métal est, soit le cuivre, et dans ce cas les deux liquides sont de l'acide azotique et de l'acide sulfurique étendu, soit le zinc, plongeant dans de l'acide sulfurique étendu d'un côté et dans de l'eau tiède de l'autre. Dans les deux cas le pôle positif se trouve sur le métal qui plonge dans le second liquide.

Digitized by Google

Dans la pile de Barclay [*Fortschritte* (1861)] le vase extérieur est en terre et contient un cylindre de fonte, ou est simplement en fonte; on le remplit d'eau salée concentrée. Le vase poreux, rempli d'un mélange à parties égales d'acides sulfurique et azotique, contient une autre lame de fonte. Le pôle positif est sur la fonte qui plonge dans l'eau salée, et le pôle négatif sur celle qui plonge dans le mélange des acides.

Matteucci [*Annales de Chimie et de Physique*, t. XXXIV, 3e série (1852)] a fait une étude des piles à deux liquides et un seul métal. Un des liquides est contenu dans un vase de verre, l'autre dans un récipient intérieur de terre poreuse. Deux lames de platine, larges de $0^m,03$ et hautes de $0^m,12$, plongent dans les deux liquides.

Les liquides étudiés par Matteucci sont les suivants :

A. *Liquides donnant le pôle négatif.*

1° Dissolution concentrée de pentasulfure de potassium (KS^5), obtenue en faisant bouillir une solution concentrée de potasse caustique avec un excès de fleur de soufre.

2° Dissolution concentrée de protosulfure de potassium (KS), obtenue en saturant par l'acide sulfhydrique une partie de potasse et la mélangeant ensuite avec une autre partie égale de potasse, restée à l'état de potasse caustique.

3° Dissolution saturée d'acide sulfureux.
4° » d'hyposulfite de soude.
5° » de sulfate de potasse.
6° » de potasse caustique concentrée.
7° » de sulfate de protoxyde de fer.

B. *Corps donnant le pôle positif.*

1° Acide azotique pur et concentré.

2° Dissolution concentrée d'acide chromique.

3° Eau acidulée sulfurique au huitième ou au dixième.

4° Couche de bioxyde de plomb, tassée sur la lame de platine et imbibée d'eau acidulée sulfurique.

Digitized by Google

La pile à potasse et acide nitrique n'est autre que la pile primitive de Becquerel.

L'emploi du bioxyde de plomb a été proposé par Becquerel, de la Rive et Schœnbein.

Souvent Matteucci mettait les liquides dans deux cylindres poreux identiques, plongés tous deux dans de l'eau acidulée au huitième ou au dixième.

Ces piles ont en général une force électro-motrice assez grande, mais elles ne sont pas bien constantes. Un seul couple à acide nitrique et pentasulfure de potassium décompose l'eau; une pile de 12 couples donnait dans un voltamètre 71^{cc} de gaz tonnant en cinq minutes, et 12 éléments de Grove en dégageaient 133 dans le même temps, c'est-à-dire presque le double.

Digitized by Google

CHAPITRE CINQUIÈME.

PILES SECONDAIRES. — PILES A GAZ. — PILES SÈCHES.

§ I. — Piles secondaires.

Volta, puis Erman ont reconnu qu'une bande de papier humide conserve pendant quelque temps les électricités qu'elle a acquises en fermant le circuit d'une pile ordinaire. Partant de cette observation, Ritter soumit à l'action d'une pile voltaïque une autre pile formée de disques de métal séparés par des rondelles de carton humide. Après un certain temps, Ritter sépara les deux piles et, réunissant les extrémités de la seconde par un conducteur, il vit qu'un courant électrique temporaire s'établissait dans ce conducteur (1805). De plus, le sens de ce courant temporaire indiquait que l'extrémité positive était celle qui communiquait avec le pôle positif de la pile voltaïque.

On appelle *pile secondaire* tout assemblage qui, comme la pile de disques de métal alternant avec les disques de carton humide de Ritter, acquiert temporairement les propriétés des piles voltaïques, après qu'elle a été interposée pendant quelque temps dans un circuit voltaïque ordinaire.

Pour faire usage d'une pile secondaire, il faut se servir d'une pile principale pour électriser en quelque sorte la première. Une fois que la pile secondaire est chargée, on peut la garder ouverte pendant un certain temps et obtenir plus tard la décharge temporaire dont elle est capable en fermant son circuit par un conducteur. Il y a quelque analogie entre l'usage d'une pile secondaire et celui d'une batterie de bouteilles de Leyde. Quand cette batterie a été chargée, on peut la conserver pendant quelque temps électrisée et obtenir plus tard une décharge,

Digitized by Google

sorte de courant électrique temporaire, en réunissant les armatures de la batterie par un conducteur. Mais si cette analogie est commode pour faire comprendre les applications des piles secondaires, elle ne donne pas exactement l'explication des phénomènes qui s'y accomplissent.

Volta entrevit l'explication du phénomène de Ritter, puis les travaux de Marianini, Matteucci, Becquerel la complétèrent. Voici quelle est cette explication :

Lorsque la pile secondaire est dans le circuit de la pile voltaïque, le liquide dans lequel plongent les lames solides subit l'électrolyse ; l'un des éléments chimiques mis en liberté par le courant se porte sur l'une des lames métalliques, et l'autre élément se porte sur la seconde lame métallique. Par suite, cette couche liquide se trouve entre deux surfaces hétérogènes, capables d'engendrer un courant, tant que les subtances différentes qui les recouvrent n'auront pas entièrement disparu en se recombinant.

Pour fixer les idées, considérons une couche d'eau A entre deux lames de platine B, C, lesquelles communiquent respectivement avec les pôles d'une pile D, capable de décomposer l'eau.

L'hydrogène se portera sur la lame négative B, et l'oxygène se portera sur la lame positive C. De cette façon, les deux lames ne seront plus dans le même état qu'auparavant ; elles différeront par l'espèce de vernis gazeux qui les recouvre maintenant et qui établit entre elles une différence de potentiel, une force électro-motrice inverse de celle de la pile.

Supprimons la pile D et réunissons les lames B, C par un conducteur BD'C. La force électro-motrice produit un courant temporaire qui ramène l'hydrogène de B vers l'oxygène de C, et jusqu'à ce que les vernis gazeux des lames aient disparu, et que les deux lames soient revenues dans le même état, il y a persistance, dans le circuit extérieur, d'un courant dont le sens est contraire à celui du courant générateur.

Remarquons en outre que, quand les lames B et C ont été *polarisées* par la pile D, elles ne peuvent conserver indéfi-

Digitized by Google

niment leur différence, bien qu'aucun conducteur BD′C ne soit interposé. La recomposition de l'eau par les gaz déposés sur les lames s'accomplit dès la suppression de la pile D, mais elle est très lente, et voilà comment on peut utiliser la décharge secondaire après un temps assez long. Cette décharge est évidemment d'autant plus faible qu'on a attendu plus longtemps pour l'opérer.

La force électro-motrice d'un élément de pile secondaire est exactement ce que nous avons appelé *force de polarisation* dans l'électrolyse du liquide de l'élément par un courant voltaïque. Ainsi, dans l'exemple précédent, cette quantité n'est autre chose que la force de polarisation du voltamètre à eau. Si on change le liquide et les éléments solides, on a d'autres forces électro-motrices, et la méthode que nous avons donnée pour étudier les forces de polarisation convient pour la comparaison des piles secondaires.

Pour qu'une pile secondaire fonctionne, il n'est pas nécessaire qu'il y ait eu électrolyse, au moins d'une manière nette; la simple polarisation suffit. C'est ainsi qu'un seul élément Daniell, incapable de décomposer l'eau dans un voltamètre, donne à une pile secondaire une polarisation assez forte pour qu'on obtienne un courant secondaire très appréciable.

On voit que c'est surtout pour faire des *réserves d'électricité* que les piles secondaires sont utiles. Jacobi s'en servit dès 1847 pour neutraliser les charges électriques qui persistent dans les cables télégraphiques après l'ouverture du circuit. Pour cela il plaçait dans le circuit une pile secondaire à platine et eau, et après chaque émission du courant principal dans la ligne télégraphique il lançait dans cette ligne le courant inverse de la pile secondaire [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLIX (1859)].

M. Planté entreprit vers 1859 des recherches sur les courants secondaires produits par divers métaux et par l'eau. Il reconnut la supériorité du plomb sur le platine et proposa ce métal pour la télégraphie, dans la disposition de Jacobi. Puis il montra tout le parti qu'on peut tirer de ce genre de piles, par

Digitized by Google

exemple pour l'inflammation des mines [*Annales de Chimie et de Physique*, t. XV (1868)].

L'élément de la pile secondaire de Planté est constitué par deux lames de plomb immergées dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. La lame positive se couvre d'une couche veloutée de bioxyde de plomb, pendant l'action de la pile principale, et la lame négative se couvre d'hydrogène gazeux. Il y a pendant la décharge de la pile secondaire recomposition d'eau par l'hydrogène de la lame négative et l'oxygène du bioxyde de plomb déposé sur l'autre lame. En outre, la lame primitivement hydrogénée se combine avec l'acide sulfurique et l'oxygène de l'eau pour former le sulfate de plomb, ce qui augmente l'intensité de la force électro-motrice ordinaire. Il est remarquable que le sulfate de plomb se forme ici, tandis qu'il ne se produit pas quand on plonge simplement une lame de plomb dans de l'eau aiguisée d'acide sulfurique.

D'après M. Planté, la force électro-motrice d'un élément à lames de plomb, mesurée immédiatement après la rupture du courant principal, est une fois et demie celle d'un élément Bunsen ordinaire.

Les éléments d'une pile secondaire doivent être associés entre eux suivant les mêmes règles que les éléments voltaïques. Quand on connaît leur force électro-motrice et leur résistance, on peut résoudre des questions analogues à celles que nous ont présentées les piles ordinaires.

Pour la pratique, on adopte des dispositions commodes pour réunir un grand nombre d'éléments, soit en surface, soit en tension. On arrive ainsi à obtenir à l'aide d'une pile principale très faible, 2 ou 3 éléments de Bunsen, les effets des piles les plus puissantes, soit comme piles de quantité, soit comme piles de tension; mais ces effets ne durent que quelques instants.

Voici quelle est la disposition adoptée par M. Planté dans son Mémoire de 1868 [*Annales de Chimie et de Physique* (1868)].

Chaque élément secondaire est formé par une auge rectan-

Digitized by Google

gulaire en gutta-percha, munie de deux rainures principales dans lesquelles sont insérées les lames de plomb. Chacune d'elles a $0^m,20$ de hauteur, autant de largeur et $0^m,005$ d'épaisseur. L'auge est remplie d'eau aiguisée d'acide sulfurique, elle est fermée et le couvercle est muni d'un trou pour laisser passer les gaz. Chaque lame de plomb est soudée à une lame de cuivre qui aboutit à une planchette horizontale, portant le *commutateur à bascule*.

Le but de cette partie de l'appareil est de rassembler à volonté les éléments secondaires en quantité ou en tension. Dans le premier cas, toutes les lames paires communiquent entre elles; il en est de même de toutes les impaires. Dans le second cas, chaque lame paire d'un élément communique avec la lame impaire de l'élément suivant. C'est la bascule qui, par un changement de position, fait passer rapidement d'un de ces arrangements à l'autre.

La *fig.* 96 représente une batterie de 20 éléments.

Une batterie semblable de 40 éléments peut être chargée par 3 éléments de Bunsen de $0^m,15$ à $0^m,20$ de hauteur. Pour la charger, on abaisse la bascule de manière à réunir tous les éléments en surface.

Chargée au maximum, la batterie équivaut à 60 éléments de Bunsen d'une surface égale à celle des éléments secondaires.

En laissant pendant la décharge la bascule dans la position qu'elle avait pendant la charge, on obtient un courant temporaire de quantité, capable de fondre un gros fil d'acier. En mettant la bascule dans l'autre position, on obtiendra un courant de forte tension capable de produire un arc voltaïque de courte durée, de fondre un long fil de métal très fin, de surmonter en général une grande résistance.

D'une manière générale, la durée de la décharge secondaire est une fraction très petite de la durée de la charge par la pile principale. Cette dernière durée est d'ailleurs limitée par l'action chimique de recomposition qui ramène peu à peu les lames de plomb à l'état naturel quand on les abandonne à elles-mêmes en circuit ouvert, dans une pile composée d'un grand

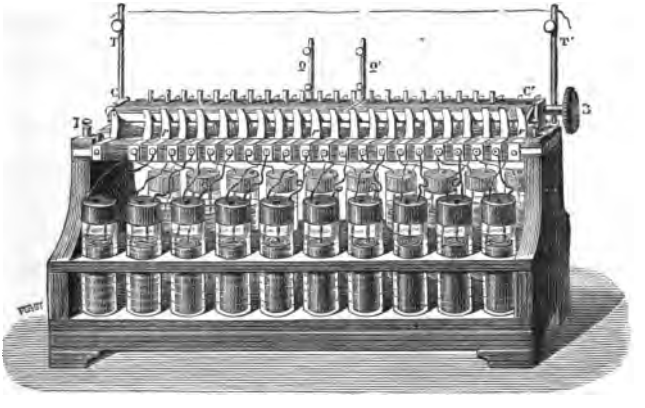
Digitized by Google

nombre d'éléments. Comme on charge avec la même pile les éléments secondaires par groupes successifs, établis d'après leur résistance, il ne faut pas que le premier groupe soit notablement affaibli, quand on achève la charge du dernier.

Est-il possible, par exemple, de charger avec deux couples Bunsen ordinaires une pile secondaire de 400 éléments à lames de plomb, ayant chacune 20^{dmq}? D'après M. Planté, il faut dix minutes pour charger un seul élément et par conséquent quatre mille minutes ou soixante-six heures pour la pile totale. On voit que dans ce cas les premiers éléments auraient perdu leur force quand on préparerait les derniers.

En ce qui concerne le rapport qui doit exister entre l'étendue de la batterie qu'on peut charger et le nombre des éléments de la pile principale dont on veut faire usage, il faut remarquer que ce rapport a une limite supérieure. En effet, pendant que la batterie secondaire et la pile principale sont dans le même

Fig. 96.



circuit, les lames de plomb sont le lieu de deux forces inverses, à savoir une force de décomposition qui produit la charge, et une force de recomposition qui s'oppose à cette même charge. Cette dernière croît peu à peu et finit par équilibrer l'autre; c'est alors que la charge s'arrête. L'action de recomposition est d'autant plus sensible que la couche de bioxyde de plomb

Digitized by Google

est plus lentement déposée; par conséquent, si le dépôt est trop lent, il n'y a pas de charge appréciable. D'autre part, le dépôt est d'autant plus lent que la batterie a une surface plus grande; de là résulte une limite supérieure de cette surface. C'est à l'expérience de faire connaître les dimensions les plus convenables dans la pratique.

Pour certains effets de tension, M. Planté a récemment [G. Planté, *Recherches sur l'Électricité* (Paris, 1879); *Journal de Physique*, t. VII (1878)] fait usage de 800 éléments secondaires; la surface de chacun d'eux était de 2^{dmq} environ. Ils étaient rassemblés en vingt batteries de 40 éléments, analogues à celle qui est représentée dans la *fig.* 96, sauf que cette dernière ne renferme que 20 éléments. Chaque batterie était chargée séparément par une pile principale de deux bunsens. Quand les vingt batteries étaient chargées, on réunissait tous leurs éléments en une seule série par leurs pôles contraires et on avait la série de 800 éléments secondaires montés en tension.

Au moyen d'un commutateur convenable, il était également possible de réunir les éléments en plusieurs séries parallèles.

En associant la pile secondaire de 800 éléments avec un condensateur à lames de mica, on peut obtenir des effets identiques à ceux que produisent les décharges d'électricité statique engendrées par les machines à frottement ou à influence. M. Planté a décrit, sous le nom de *machine rhéostatique* [*Journal de Physique*, t. VII, p. 20 et 298 (1878)], une disposition de cette sorte, qui permet de produire des étincelles de $0^m,05$ de longueur.

Les piles secondaires sont susceptibles d'applications industrielles. On a proposé leur emploi pour enflammer des mines, pour faire rougir des fils de platine que les chirurgiens emploient pour cautériser des plaies, etc.

§ II. — Pile a gaz.

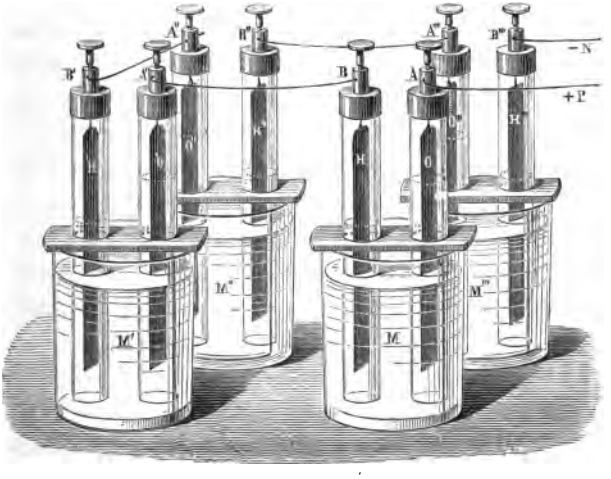
On peut rattacher aux piles secondaires la pile à gaz oxygène et hydrogène de Grove. Ce physicien ayant plongé deux lames

Digitized by Google

de platine respectivement dans une cloche de gaz oxygène et une autre d'hydrogène, puis ayant réuni ces lames au fil d'un galvanomètre, remarqua qu'un courant était produit, allant de l'oxygène à l'hydrogène par le galvanomètre (*Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. VIII et XI). Ce sens est justement celui du courant secondaire qu'engendrent les fils de platine d'un voltamètre à eau quand il a servi à l'électrolyse. Il n'y a donc pas de différence essentielle entre les deux phénomènes dont il s'agit. Les lames de platine sont recouvertes dans l'un et l'autre cas par une sorte de couche gazeuse, oxygénée d'un côté, hydrogénée de l'autre, et c'est cette différence d'état des deux lames qui entraîne la création d'un courant.

Un élément de la pile à gaz est formé d'un vase M, contenant de l'eau acidulée (*fig.* 97). Une planchette posée sur

Fig. 97.



les bords porte deux cloches de verre. Dans chaque cloche est une lame de platine platiné, terminée en haut par un fil de platine soudé dans le verre. On remplit l'une des cloches d'oxygène, l'autre d'hydrogène, et pour cela le procédé le plus commode est d'y introduire d'abord l'eau même du flacon

Digitized by Google

en retournant l'appareil, puis de le redresser et de faire communiquer les deux lames de platine respectivement avec les pôles d'une pile voltaïque. L'eau est décomposée et les gaz remplissent les deux cloches.

Lorsque plusieurs éléments sont réunis en une série par leurs pôles contraires, on observe tous les effets des courants. Comme l'origine du travail produit est dans la combinaison chimique accomplie dans la pile, les gaz des cloches disparaissent peu à peu en reformant de l'eau, les niveaux de l'eau remontent dans les cloches, la résistance de la pile change, et le courant recueilli dans le circuit extérieur ne peut être constant.

Ce genre de pile ne présente qu'un intérêt scientifique.

§ III. — Piles sèches.

L'idée des piles sèches a été suggérée par une opinion erronée, qui s'est manifestée après les expériences de Volta sur le contact. On croyait que le contact de deux corps pouvait suffire pour engendrer non pas seulement une force électromotrice, mais un courant électrique dans un circuit fermé, et cela sans que la substance de ces corps subît d'altération, sans dépense d'énergie extérieure sous une forme ou sous une autre. On chercha donc à combiner des assemblages, qui, aux yeux des inventeurs, devaient réaliser *le mouvement perpétuel par l'électricité*. Mais il est facile de s'assurer que les piles sèches sont le siège d'une action chimique, comme toutes les autres piles, et qu'elles n'en diffèrent que par l'excessive lenteur de cette action. A ce point de vue, d'ailleurs, il y a quelque intérêt à savoir qu'on peut se procurer une pile pouvant fonctionner pendant plusieurs années sans que son usure soit notable.

La première pile sèche est celle de Behrens (1805); elle était formée de disques de zinc, cuivre et papier doré, empilés comme les éléments voltaïques. Deluc (1810) se servit de fer

Digitized by Google

étamé et de papier doré. Zamboni (1812) employa des disques de papier recouverts d'étain sur une face et de bioxyde de manganèse fixé à la colle sur l'autre face. Avec 200 éléments de Zamboni on obtient de petites étincelles et on peut décomposer l'eau.

La présence du papier dans toutes les piles de ce genre indique que l'humidité joue probablement un rôle important dans ce mode de génération d'électricité. Ermann, ayant mis une pile sèche dans un vase bien desséché par du chlorure de calcium fondu, vit l'appareil perdre ses propriétés. Il les reprit ensuite quand on le replaça dans l'air humide. Il ne faut pas d'ailleurs que l'humidité soit trop grande, parce qu'alors l'isolement des différents éléments de la pile deviendrait insuffisant. Cela explique comment les piles sèches sont sensibles aux changements d'humidité de l'atmosphère.

Rappelons encore la pile sèche de Watkins (p. 128), composée de plaques de zinc, polies sur une face et non sur l'autre, et séparées par de petites couches d'air. C'est une sorte de pile à auges, formée par un seul métal et l'air atmosphérique. La face polie joue le rôle de métal positif dans chaque élément.

Toutes les piles sèches offrent en général une grande force électro-motrice, parce qu'elles sont composées d'un très grand nombre d'éléments; mais leur résistance est considérable, et par suite le courant qu'elles peuvent produire quand leurs pôles sont réunis par un conducteur est très faible. On ne peut donc les utiliser que pour quelques effets de tension, par exemple pour obtenir une continuité de petites étincelles ou la charge permanente d'un électroscope.

Digitized by Google

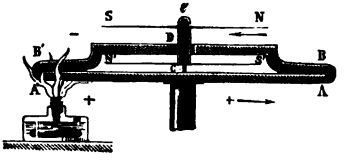
CHAPITRE SIXIÈME.

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

Après que Seebeck eut découvert, en 1821, que la chaleur peut engendrer un courant électrique dans un circuit formé de plusieurs conducteurs métalliques, on chercha à disposer des appareils capables de produire tous les effets des courants hydro-électriques par la simple action de la chaleur. Ces appareils portent le nom de *piles thermo-électriques*.

Un élément thermo-électrique se compose de deux soudures réunissant deux métaux différents. Ainsi l'élément le plus simple est formé d'un barreau de bismuth AA', aux extrémités duquel est soudée une lame de cuivre BB'. Si l'on chauffe la soudure A'B' seule, il se produit un courant qui va du cuivre au bismuth à travers la soudure chauffée (*fig.* 98).

Fig. 98.



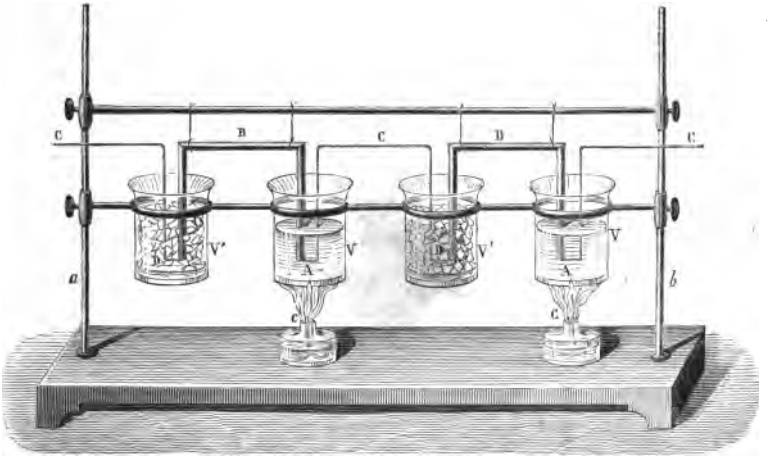
On peut assembler plusieurs éléments thermo-électriques semblables, et pour que leurs effets s'ajoutent il faut chauffer toutes les soudures du même rang et refroidir toutes les autres. De là diverses dispositions expérimentales, usitées dans les cabinets de Physique.

Dans la pile de Pouillet (*fig.* 99), des barreaux de bismuth recourbés en fer à cheval alternent avec des lames de cuivre recourbées de la même manière. Toutes les soudures de rang

Digitized by Google

impair sont disposées dans la glace, et celles de rang pair sont chauffées par de l'eau maintenue bouillante. On obtient

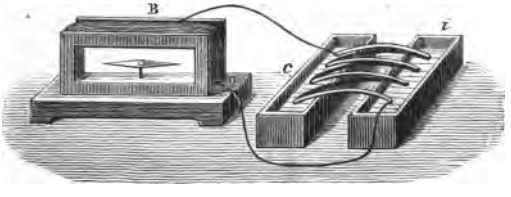
Fig. 99.



une force électro-motrice totale proportionnelle au nombre d'éléments.

Une disposition plus commode consiste à placer toutes les soudures de même rang d'un même côté, afin de pouvoir les maintenir à la même température. La *fig.* 100 montre les

Fig. 100.



soudures paires dans un vase où l'on a mis de la glace, et les soudures impaires dans un second vase où se trouve de l'eau chaude.

La force électro-motrice d'un élément thermo-électrique dépend de la nature des deux métaux constituants et de la différence de température des soudures.

Digitized by Google

Voici, d'après M. Becquerel, une liste de métaux telle que chacun d'eux est positif par rapport aux suivants, c'est-à-dire que le courant traverse la soudure chaude en allant du métal placé en dessous sur la liste vers le métal placé en dessus. Plus les deux métaux sont éloignés l'un de l'autre dans cette liste, plus grande est leur force électro-motrice.

Antimoine,
Fer,
Zinc,
Argent,
Or,
Cuivre,
Étain,
Plomb,
Platine,
Bismuth.

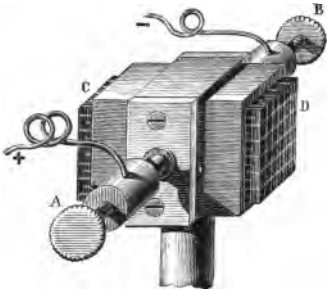
Les lois que suivent les courants thermo-électriques sont très compliquées. Dans certains couples, la force électromotrice est proportionnelle à la différence de température des deux soudures : c'est le cas des couples bismuth-cuivre, cuivre-argent et surtout cuivre-or, comme l'a montré M. Gaugain. Pour d'autres éléments, il n'y a proportionnalité que si la différence de température est petite; dans le couple bismuth-antimoine, par exemple, la proportionnalité n'existe plus dès que la température des soudures n'est plus comprise entre 15° et 35°.

Enfin d'autres éléments présentent le curieux phénomène de l'inversion. A une certaine température le courant change de sens. Il est donc possible de maintenir les deux soudures à des températures très différentes, sans pour cela obtenir le moindre courant. M. Gaugain, qui a publié une étude très étendue sur les courants thermo-électriques, a montré que la température d'inversion dépendait de l'état des deux soudures à la fois. Ainsi, dans le couple zinc-fer, l'inversion se produisait à 376° quand la soudure froide était maintenue à 20° et à 295° seulement quand la soudure froide était portée à 100°.

Digitized by Google

D'après la liste des métaux publiée plus haut, on doit obtenir une force électro-motrice relativement grande, avec une même différence de température, en construisant la pile avec l'antimoine et le bismuth. C'est ce qu'a fait Melloni, et il a obtenu de cette manière un assemblage très usité comme thermomètre différentiel. Les barreaux sont rassemblés en un cube (*fig.* 101), séparés les uns des autres par

Fig. 101.



des bandes de papier, et arrangés de façon que l'une des faces soit formée par les soudures impaires et la face opposée par les soudures paires. Quand on établit avec le fil d'un galvanomètre et la pile un circuit fermé, la déviation de l'aiguille peut faire connaître, après graduation expérimentale, la différence des températures des deux faces de la pile.

Cette pile est très usitée en Physique. M. Becquerel l'a modifiée de diverses manières (aiguilles thermo-électriques), de façon qu'elle permette de déterminer les températures dans les conditions où les thermomètres ordinaires ne sont pas applicables.

Depuis quelques années, des efforts ont été faits dans le but de créer une pile thermo-électrique capable de remplacer industriellement les piles hydro-électriques. Nous croyons utile de faire connaître les principaux résultats auxquels on est arrivé dans cette voie.

Morren [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. XLI (1855); *Archives de Genève,* t. XXX] pro-

Digitized by Google

posa, en 1855, de remplacer l'antimoine par le fer-blanc dans la pile de Melloni. Il construit sa pile de la manière suivante :

On coule des prismes de bismuth de $0^m,001$ d'épaisseur et de $0^m,02$ de longueur, en laissant aux deux bouts, sur deux côtés opposés, deux petits échelons ou feuillures. On couvre alors tout le barreau, excepté les feuillures, de mastic à luter le verre.

Pour le fer, on choisit une feuille de fer-blanc, la plus mince possible, mais d'un métal très doux; il est bon même de construire d'abord un élément d'essai avec chaque feuille et de les comparer, afin de s'arrêter à la feuille qui donne les meilleurs résultats.

On la coupe alors en lames très minces, de $0^m,001$ de large et de $0^m,02$ de haut, dont on rabat au marteau et en sens inverse les deux extrémités, de manière à donner à la lame une forme de Z. On écrouit ensuite une des extrémités avec le marteau et on lime la lame jusqu'à ce qu'elle s'appuie parfaitement sur le prisme de bismuth, une partie rentrant dans la feuillure. On chauffe légèrement pour faire adhérer le fer-blanc au mastic; puis, avec un fer à souder suffisamment chaud, on touche la partie rentrant dans la feuillure et l'on fait couler le bismuth excédant sur le fer-blanc, ce qui produit la soudure. On enlève alors à la lime l'excès de bismuth qui a recouvert le fer-blanc. La soudure et le contact des deux métaux sont ainsi irréprochables et sans intermédiaires.

On assemble les éléments en mettant toutes les extrémités écrouies du même côté, de manière à en former des séries planes de 4, 6 ou 8 couples, selon le nombre définitif de couples qui doivent entrer dans la pile. En chauffant légèrement ces séries le mastic qui les enduit fond à la surface, ce qui permet l'adhérence.

Pour relier les couples extrêmes de chaque série, on a soin qu'elles soient toutes terminées par les bismuths; puis, au moyen d'une agrafe convenablement faite en fer-blanc, on relie la feuillure d'un bismuth avec la feuillure opposée du bismuth voisin. Enfin on coule partout du mastic pour empêcher les contacts entre les différents éléments.

Digitized by Google

D'après l'auteur, les avantages de cette pile seraient les suivants :

1° La construction de la pile est plus simple et plus facile que celle qui est faite avec des prismes d'antimoine.

2° L'écrouissage d'une extrémité de la lame de fer-blanc augmente sa sensibilité, et alors cette pile peut rivaliser avec celle de Melloni.

3° Le peu d'épaisseur du fer-blanc diminue considérablement la masse métallique, et permet, sous un volume donné, d'avoir un beaucoup plus grand nombre de couples.

4° Enfin l'auteur ajoute que la réaction thermo-électrique des deux métaux n'est plus gênée par l'interposition des métaux étrangers apportés par la soudure. Cette dernière conclusion est inexacte, car on sait, depuis les expériences de Gaugain, que la nature de la soudure ne change en rien la force électro-motrice d'un couple thermo-électrique.

Dans la série thermo-électrique, le bismuth est l'un des termes extrêmes, et l'autre est un alliage d'antimoine et d'étain (2Sb, Sn).

Bunsen a trouvé que, dans cette série, la pyrolusite doit être placée au-dessus du bismuth, et que la pyrite cuivreuse est encore plus élevée [*Poggendorff's Annalen*, t. CXXIII (1864); *Archives de Genève*, t. XXII; *Philosophical Magazine*, t. XXIX; *les Mondes*, t. VII]. On doit donc obtenir une pile thermo-électrique très intense en associant la pyrite et l'alliage indiqué ci-dessus, ou mieux la pyrite et le cuivre, pour pouvoir porter plus haut la température.

L'élément de pile de Bunsen est formé d'une lame de pyrite de $0^m,070$ de long, $0^m,040$ de large et $0^m,007$ d'épaisseur, vers les deux extrémités de laquelle on enfonce deux cônes de cuivre platiné. L'un de ces cônes se termine par un prolongement en cuivre que l'on chauffe à la lampe, et l'on maintient l'autre dans l'eau froide. Les deux cônes portent, en outre, les extrémités du fil du circuit.

Bunsen a comparé cet élément avec un daniell ayant un

Digitized by Google

cuivre de 1^{dq} de surface immergée et chargé avec un mélange de 6 parties d'eau en poids pour 1 d'acide sulfurique.

La force électro-motrice et la résistance du daniell étant prises pour unités, le couple thermo-électrique, essayé à quatre températures différentes, a donné :

Comme force électro-motrice...	$\frac{1}{14,7}$	$\frac{1}{11,9}$	$\frac{1}{10,9}$	$\frac{1}{9,7}$
Comme résistance	0,74	0,79	0,72	0,72

Pendant l'expérience, la température de l'eau destinée à refroidir le contact inférieur s'est élevée au-dessus de 60°, au lieu de rester constante.

Bien que la température de la pince chauffée eût dépassé celle de fusion de l'étain, la pyrite n'a éprouvé aucune modification sensible.

La pyrite se dilate moins que le cuivre, ce qui fait que les cônes menaçaient de rompre le barreau à une température élevée. On pourrait remédier à cet inconvénient, soit en se servant de pinces à ressort, soit en prenant des cônes de cuivre fendus qui pourraient s'adapter à l'ouverture. On pourrait alors chauffer plus fort; mais, même dans les limites de température de l'expérience, le nouveau couple donnait une force électro-motrice égale à dix fois celle d'un élément bismuth-antimoine entre 0° et 100°. 10 de ces éléments, réunis en pile, produisent tous les effets d'un couple de Daniell ayant une surface de 14^{cq} de cuivre immergée.

La pyrite naturelle peut fondre sans se décomposer; mais la fusion lui fait subir une modification qui la fait descendre bien au-dessous du bismuth dans la série thermo-électrique; il faut donc se servir du minéral à l'état naturel. On peut, du reste, le travailler facilement pour lui donner la forme voulue.

La pyrolusite et le platine donnent un élément dont la force électro-motrice peut atteindre le dixième d'un daniell. En enroulant des fils de platine autour des deux extrémités d'un cylindre de pyrolusite de $0^m,006$ de diamètre et $0^m,050$ de long, et en chauffant une des extrémités à la lampe, tandis que l'autre

Digitized by Google

est maintenue dans l'eau froide, on obtient un couple dont la force électro-motrice s'élève à $\frac{1}{9,8}$ d'un daniell. Mais la résistance est très grande et environ dix-huit fois celle du même élément Daniell, de sorte que le courant produit est peu intense.

Marcus a essayé de réaliser une nouvelle pile thermo-électrique en partant des données suivantes [*Sitzungsberichte der Akademie in Wien* (1864-1865); *Poggendorff's Annalen*, t. CXXIV; *Philosophical Magazine*, t. XXIX; *les Mondes*, t. VIII] :

Employer deux substances aussi éloignées que possible dans la série thermo-électrique, mais telles que leur point de fusion soit très élevé, de façon que, sans glace, on puisse réaliser aux deux soudures de grandes différences de température.

Employer des matériaux peu coûteux et leur donner une forme facile à construire. Enfin isoler les barreaux par une substance qui puisse supporter une haute température, tout en possédant une solidité et une élasticité suffisantes.

Il a réalisé ces conditions de la manière suivante. Pour métal positif, il prend un mélange de :

Cuivre.....	10
Zinc.....	6
Nickel.....	6

En y ajoutant une partie de cobalt, on augmente encore la force électro-motrice.

Le métal négatif est l'alliage suivant :

Antimoine.....	12
Zinc.....	5
Bismuth.....	1

Des fusions réitérées augmentent la force électro-motrice de cet alliage.

Marcus a encore employé comme métal positif de l'argentan, avec le nickel comme métal négatif, ou bien un alliage de 65 de

Digitized by Google

cuivre et 31 de zinc, associé avec un alliage de 12 d'antimoine et 5 de zinc comme corps négatif.

Avec les proportions indiquées plus haut pour la première combinaison, le métal positif fond vers 1200° et le métal négatif vers 600°. Comme, dans cet élément, c'est le métal positif qu'il importe le plus de chauffer, on peut ne faire arriver la chaleur au métal négatif que par conduction et atteindre ainsi sur le métal positif des températures de plus de 600°. Les barreaux ne sont du reste pas soudés les uns aux autres, mais simplement reliés par des vis.

La pile a été disposée pour être chauffée au gaz; pour cela, les barreaux n'ont pas tous les mêmes dimensions : les barreaux positifs ont $0^m,189$ de long, $0^m,016$ de large et $1^{mm},1$ d'épaisseur; les barreaux négatifs ont $0^m,162$ de long, $0^m,016$ de large et $13^{mm},5$ d'épaisseur. 32 de ces éléments étaient vissés ensemble, de sorte que tous les barreaux positifs étaient inclinés d'un côté, tous les barreaux négatifs de l'autre, le tout ayant la forme d'une grille. La pile elle-même était formée de deux de ces grilles vissées ensemble en forme de toit et renforcées par une barre de fer.

On a employé le mica pour isoler la barre de fer des éléments; de plus, les parties des éléments qui devaient plonger dans l'eau froide avaient été recouvertes de verre fusible. Tous les contacts inférieurs, qui devaient être refroidis, plongeaient simplement dans une même auge de terre pleine d'eau froide.

La pile entière avait $0^m,64$ de long, $0^m,162$ de large et $0^m,162$ de haut.

La force électro-motrice d'un seul élément est le $\frac{1}{25}$ d'un élément Daniell, et sa résistance est de $0^{ohm},004$.

6 de ces éléments décomposaient l'eau acidulée; 125 dégageaient par minute 25^{cc} de gaz tonnant, et dans des circonstances très défavorables, car la résistance intérieure était beaucoup plus grande que celle du voltamètre.

Cette même pile fondait un fil de platine de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre, et 30 éléments pouvaient faire porter 75^{ks} à un électro-aimant.

Digitized by Google

La pile présente un exemple curieux de transformation de chaleur en électricité, par ce fait que l'eau destinée à refroidir l'une des séries de soudures s'échauffait très lentement tant que le circuit était fermé, mais devenait très promptement chaude par simple conductibilité des barreaux dès qu'on ouvrait le circuit.

Marcus a construit en même temps un fourneau destiné à chauffer une pile de 768 éléments. Ils représentent la valeur de 30 éléments Bunsen (zinc et charbon) et consomment par jour 120^{kg} de charbon.

En étudiant la pile de Marcus [*Anzeiger der Wiener Akademie* (1865); *Poggendorff's Annalen,* t. CXXIV; *Philosophical Magazine,* t. XXX], Stefan a essayé certains minéraux qu'il avait sous la main, et de la manière suivante. Au bout d'une feuille de cuivre il mettait le corps à étudier, au-dessus l'extrémité d'un fil de cuivre, et le tout était fortement pressé. Ce fil et un autre partant de l'extrémité de la lame de cuivre étaient mis en relation avec un galvanomètre, et l'on chauffait simplement le couple en mettant la lame de cuivre dans une lampe à esprit-de-vin.

Pour faire un élément thermo-électrique avec deux minéraux, on met entre eux une lame de cuivre; sur les deux faces opposées et libres des minéraux, on place des fils de cuivre et on presse fortement le tout. La partie libre de la lame de cuivre centrale est alors placée dans la lampe à alcool et sert seulement de conducteur pour amener la chaleur au point de contact des minéraux.

Stefan a essayé ainsi 14 couples indiqués dans le Tableau suivant; les nombres placés à côté de chacun d'eux indiquent le nombre de leurs éléments nécessaire pour obtenir une force électro-motrice égale à 1 daniell.

Corps positifs (+).	Corps négatifs (—).	
1. Pyrite cuivreuse en feuillets..	Cuivre.....	26
2. Pyrite cuivreuse compacte....	Cuivre.....	9
3. Pyrolusite.....	Cuivre.....	13
4. Pyrite cuivreuse compacte....	Pyrite de cuivre en feuillets....	14

Digitized by Google

Corps positifs (+)	Corps négatifs (—).	
5. Cuivre	Pyrite de cobalt cristallisée	26
6. Pyrite de cobalt granuleux	Cuivre	78
7. Cuivre	Pyrite de fer	15,7
8. Pyrite de cuivre compacte	Pyrite de fer	6
9. Pyrite de cuivre en feuillets	Pyrite de fer	9,8
10. Cuivre	Cuivre panaché	14
11. Galène antimonifère fine	Cuivre	9,8
12. » grossière	Cuivre	9
13. » en gros cristaux	Cuivre	9,8
14. »	Cuivre panaché	5,5

La pyrite de cuivre et la pyrolusite ont déjà été essayées par Bunsen. Ses nombres s'accordent avec ceux des couples 2 et 3. Les couples 1, 2 et 4, et surtout 5 et 6, mettent en évidence la grande influence de la structure sur le pouvoir thermo-électrique des corps.

La pyrite de cobalt cristallisée est fortement négative par rapport au cuivre; la même pyrite amorphe est positive.

La galène comprise sous le n° 13 était formée d'hexaèdres unis aux octaèdres; les octaèdres étaient positifs par rapport au cuivre en certains points et négatifs pour d'autres.

Le plus puissant de ces éléments est le couple 14, qui vaut $\frac{1}{5,5}$ de Daniell, tandis que l'élément de Marcus ne vaut que $\frac{1}{18}$. Mais les substances employées dans le couple Stefan sont très résistantes, ce qui est un obstacle à l'emploi pratique de ces piles.

Il en est tout autrement au point de vue théorique, et aussi à celui de la Physique du globe où se place Stefan, car à ce dernier point de vue il est intéressant d'avoir constaté la possibilité de couples thermo-électriques très énergiques.

Dès 1827 (*Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXIV], M. Becquerel père avait remarqué qu'un fil de cuivre recouvert de sulfure de cuivre est fortement positif par rapport au cuivre ordinaire, et il avait construit avec deux fils de cuivre, dont l'un était sulfuré à la surface, un couple qui, pour une élévation de température de 200° ou 300°, décomposait le sulfate de cuivre, le nitrate d'argent, etc. Il avait

Digitized by Google

même remarqué que l'emploi du sulfure de cuivre donnait des effets plus énergiques que tous les autres corps qu'il avait essayés, tels que sulfure de fer, peroxyde de manganèse, etc.

Ces études, continuées par M. Ed. Becquerel [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LX, LXI (1865) et LXII (1866); *les Mondes*, t. VII et VIII; *Archives de Genève*, t. XXVI], l'ont amené à construire un nouvel élément thermo-électrique, dont l'annonce de la pile thermo-électrique de Bunsen a amené la publication.

M. Ed. Becquerel remarque que le soufre modifie profondément le pouvoir thermo-électrique des métaux. Par exemple, le sulfure de bismuth est plus négatif que le bismuth lui-même, de sorte qu'à la pile ordinaire bismuth-cuivre on pourrait substituer avantageusement une pile sulfure de bismuth-cuivre. Le seul inconvénient provient de ce que le sulfure de bismuth est très cassant; mais on peut le remplacer par un mélange de sulfure de bismuth et de bismuth, moins cassant que le sulfure seul et tout aussi énergique.

Inversement, le protosulfure de cuivre est plus positif que la plupart des substances connues; il convient donc éminemment pour les piles thermo-électriques. Mais il faut, pour cela, qu'il possède un état moléculaire particulier; pour le lui donner, on le fond à une température peu supérieure à son point de fusion, puis on le coule dans des moules. Il présente alors une cassure fibreuse et des bulles répandues çà et là dans la masse. Si on le fondait plusieurs fois à haute température et si on le coulait en masse homogène, son pouvoir thermo-électrique serait presque détruit.

Il en est de même, du reste, pour la pyrite cuivreuse naturelle, employée dans l'élément Bunsen. D'après Becquerel, la pyrite cuivreuse étant assez rare et difficile à travailler, il serait préférable d'employer le sulfure de cuivre artificiel, auquel la fusion donne facilement toutes les formes voulues. Le couple Becquerel est, il est vrai, un peu moins énergique que le couple Bunsen, mais la simplicité de sa construction permet

Digitized by Google

facilement de réparer cette inégalité, en employant un plus grand nombre de couples.

Quoi qu'il en soit, il faut prendre certaines précautions pour avoir le sulfure de cuivre artificiel sous le meilleur état. On le prépare en mettant de 100^{gr} à 200^{gr} de soufre au fond d'un creuset en terre, de $0^{m},25$ à $0^{m},30$ de haut sur $0^{m},12$ à $0^{m},15$ de diamètre, préalablement chauffé au rouge sombre. Le soufre entre bientôt en ébullition; alors on plonge dans sa vapeur des lames de cuivre chauffées au rouge sombre et assez épaisses : la réaction s'effectue aisément. Quand on voit que la vapeur va disparaître faute de soufre, on retire la lame couverte de sulfure, on la fait refroidir en la plongeant un instant dans l'eau pour éviter le grillage du sulfure au contact de l'air, puis on détache le sulfure formé à la surface de la lame, qui peut ainsi servir à deux ou trois opérations successives. Le sulfure de cuivre est ensuite fondu dans un creuset, puis coulé en barreaux ou en plaques. La température de fusion du sulfure est à peu près la même que celle de l'or et comprise entre 1030° et 1040°. Il faut éviter de dépasser la température de fusion du cuivre (1150°).

Malgré ces précautions, on n'obtient pas toujours des barreaux donnant le maximum d'effet thermo-électrique.

Ruhmkorff a reconnu qu'en ajoutant au sulfure de cuivre un peu de sulfure d'antimoine (au plus $\frac{1}{25}$ ou $\frac{1}{30}$ de son poids), on obtient par la fusion des barreaux qui ne présentent plus entre eux les irrégularités d'action obtenues avec le sulfure fondu seul. Ce mélange est peut-être un peu moins énergique que le sulfure de cuivre seul bien préparé; mais il donne des résultats plus sûrs et permet d'avoir plus facilement des barreaux doués d'une force électro-motrice encore très suffisante.

Enfin, Becquerel a reconnu postérieurement qu'on peut arriver à donner aux différents barreaux de sulfure de cuivre à peu près le même pouvoir thermo-électrique en les préparant avec les précautions indiquées plus haut et en les recuisant ensuite au rouge sombre pendant plusieurs heures.

La première pile de Becquerel qui ait été construite se composait de 10 éléments, dont chaque couple était formé par un

Digitized by Google

barreau cylindrique de sulfure de cuivre fondu, de $0^m,10$ de long sur $0^m,01$ de diamètre, portant un fil de cuivre rouge enroulé à chaque extrémité et placé dans une petite éprouvette en verre. L'extrémité inférieure était portée dans un bain de sable à une température de 300° ou 400°; l'extrémité supérieure restait dans l'air sans même être refroidie. Dans ces conditions défavorables, cette pile décomposait cependant avec rapidité le sulfate de cuivre et faisait fonctionner le relais d'un appareil telégraphique.

Le principal inconvénient de cette pile est sa grande résistance; cependant, à mesure que la température s'élève, le pouvoir conducteur augmente, et on peut, du reste, donner aux barreaux de sulfure une section suffisante pour compenser le défaut de conductibilité.

Depuis l'invention de la pile de Marcus, Becquerel a remplacé dans sa pile le cuivre par le maillechort, qui est fortement négatif, comme Seebeck l'avait reconnu le premier [*Mémoires de l'Académie de Berlin*, t. IX (1822-1823)], et dont l'emploi avait été également indiqué par Poggendorff [*Annales de Chimie et de Physique*, t. LXXV (1840)].

Le côté de chaque couple soumis à l'élévation de température est fixé à une plaque de maillechort directement chauffée par un bec de gaz, de sorte que c'est le métal négatif seul qui supporte l'action de la chaleur; elle n'arrive que par conductibilité au sulfure de cuivre. Il est nécessaire d'encastrer l'extrémité du barreau de sulfure dans de petites lames de maillechort fixées à vis, afin que la flamme du bec de gaz ne vienne pas griller et réduire le sulfure.

Les barreaux de sulfure employés étaient généralement à section quadrangulaire, de $0^m,020$ de large sur $0^m,012$ d'épaisseur et de $0^m,08$ de long.

Ce couple a été étudié par Becquerel en même temps qu'un couple Marcus, formé par un barreau d'un alliage de 2 parties d'antimoine pour 1 de zinc, de mêmes dimensions que le barreau de sulfure, et fixé de la même manière à des lames semblables en maillechort.

Digitized by Google

Ces deux couples ont été comparés à un couple normal bismuth-cuivre, fonctionnant entre 0° et 100°, et qui possédait dans ces conditions les 0,004826 ou $\frac{1}{207,2}$ de la force électro-motrice du couple Daniell (zinc amalgamé-sulfate de zinc, cuivre-sulfate de cuivre).

Le Tableau suivant résume le résultat de cette comparaison :

TEMPÉRATURE DE LA SOUDURE CHAUDE (soudure froide à 0°).	FORCE ÉLECTRO-MOTRICE rapportée au couple Bi-Cu.		NOMBRE D'ÉLÉMENTS nécessaires pour avoir la force électro-motrice de 1 daniell.	
	Sulfure de cuivre.	Alliage d'antimoine.	Sulfure de cuivre.	Alliage d'antimoine.
100°	3,111	1,830	66,6	113,2
200°	6,044	2,893	34,3	71,6
300°	12,561	6,227	16,5	33,3
358°,5 (ébullition du mercure)	18,000	8,300	11,5	25,0
460° environ	34,710	14,780	5,9	14,0
L'alliage d'antimoine fond entre 520° et 525°.				
550°	52,580	"	4,0	"
800°	78,880	"	2,63	"

De 800° à 1030° ou 1040° (fusion du sulfure de cuivre), la force électro-motrice du couple à sulfure n'augmente plus que de $\frac{1}{9}$ de sa valeur.

Nous avons vu que l'état du sulfure de cuivre avait une grande influence sur la force électro-motrice de la pile. Le Tableau suivant prouve cette influence, mais conduit à cette conclusion intéressante que, au delà de 400°, les différences des différents couples deviennent insignifiantes et que les effets sont sensiblement les mêmes pour tous.

Digitized by Google

TEMPÉRATURE de la soudure chaude (soudure froide à 0°).	COUPLE SULFURE DE CUIVRE N° 1 (le meilleur).		COUPLE SULFURE DE CUIVRE ORDINAIRE N° 2 (effet moyen).		RAPPORT des couples 1 et 2.
	Force électro-motrice (celle de 1 daniell = 100).	Nombre d'éléments nécessaires pour équivaloir à 1 daniell.	Force électro-motrice (celle de 1 daniell = 100).	Nombre d'éléments nécessaires pour équivaloir à 1 daniell.	
100°	3,40	29,4	1,50	66,6	2,27
200	5,98	16,7	3,17	31,5	1,72
300	8,70	11,5	6,03	16,6	1,44
400	12,63	7,9	11,15	9,0	1,14
460	17,82	5,6	16,75	5,9	1,05
500	21,75	4,6	"	"	"
800	38,06	2,6	"	"	"

Pour éviter l'altération du sulfure de cuivre, il est bon de s'arrêter aux températures de 350° ou 400°. Dans ces conditions, il faut seulement 8 ou 10 éléments de Becquerel pour obtenir une force électro-motrice égale à celle de 1 daniell.

La résistance du couple étudié, et dont les dimensions ont été données plus haut, est de 125^m de fil de cuivre, de $0^m,001$ de diamètre, tandis que la pile à alliage d'antimoine n'a qu'une résistance de $1^m,8$. Ces nombres correspondent respectivement à $2^{ohms},7$ et $0^{ohm},04$. On ne peut donc se servir de la pile à sulfure de cuivre que pour des circuits très résistants.

Une pile de 30 éléments à sulfure de cuivre et maillechort, dont une des rangées de soudures était portée à une température de 350° ou 400° à l'aide de petits becs de gaz, décomposait très rapidement l'eau acidulée dans un voltamètre et pouvait ainsi remplacer environ 3 éléments Daniell.

En même temps que sa pile à sulfure de cuivre, Becquerel a étudié plusieurs autres combinaisons thermo-électriques.

Le tellure associé au maillechort lui a donné la pile thermo-électrique la plus puissante; mais la rareté de ce corps en rend l'emploi impossible.

Les principales combinaisons de Becquerel et les résultats

Digitized by Google

qu'elles lui ont donnés sont résumés dans le Tableau suivant :

ÉLÉMENTS positifs (+).	ÉLÉMENTS négatifs (—).	FORCE électro-motrice (celle de 1 daniell = 100).	NOMBRE de couples nécessaires pour donner la force électro-motrice de 1 daniell.
1. Tellure	Maillechort	4,121	24,2
2. Sulfure de cuivre (effet maximum)	Maillechort	3,402	29,4
3. Alliage { Antimoine... 806, Cadmium.... 696 (équivalents égaux). }	Alliage { Bismuth... 10, Antimoine. 1 }	2,761	36,2
4. Alliage { Antimoine... 806, Cadmium.... 696, $\frac{1}{10}$ du poids du mélange de bismuth. }	Id.	1,920	52,1
5. Id	Maillechort	1,426	70,0
6. Alliage { Antimoine... 806, Zinc.... .... 406, $\frac{1}{10}$ du poids du mélange de bismuth. }	Maillechort	0,896	111,6
7. Antimoine	Bismuth	0,532	188,0
8. Cuivre	Bismuth	0,391	256,0

Pour tous ces couples, les températures des soudures étaient 0° et 100°.

Comme seule observation, on peut remarquer que le couple 3, à alliage d'antimoine et de cadmium, est très propre à la construction des piles thermo-électriques destinées à l'étude de la chaleur rayonnante. Il est à la fois plus puissant et meilleur conducteur que le couple ordinaire antimoine-bismuth, de sorte que dans un galvanomètre il donne des effets de six à huit fois plus considérables.

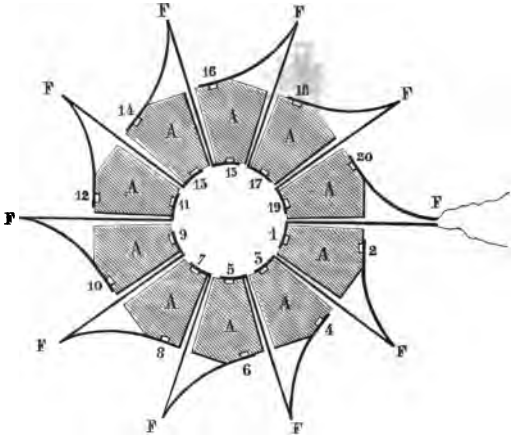
Après avoir été considérées pendant longtemps seulement comme des instruments de laboratoire, les piles thermo-électriques semblent sur le point d'entrer maintenant dans la pratique. La pile qui semble se prêter le mieux aux applications industrielles est celle de M. Clamond.

Digitized by Google

Après avoir essayé, en collaboration avec M. Mure, des éléments galène et fer qui s'altéraient assez rapidement, M. Clamond [*Journal de Physique*, t. III (1874)] a adopté l'alliage de Marcus, zinc et antimoine, associé au fer.

Les éléments thermo-électriques sont disposés par séries de dix; chaque série forme une couronne circulaire (*fig.* 102) con-

Fig. 102.

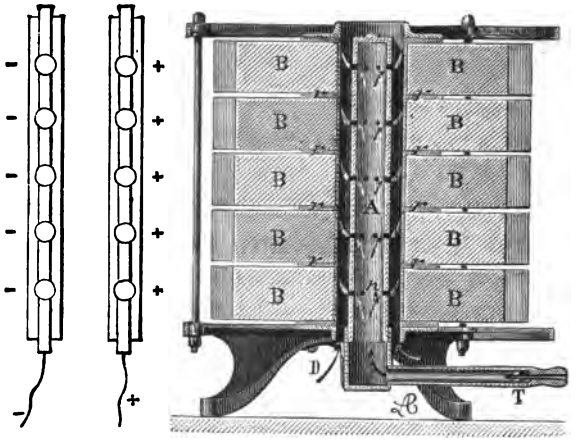


tenant dix barreaux d'alliage de Marcus A, A, reliés l'un à l'autre par des lames de fer F, F très minces et qui dépassent beaucoup, de manière à offrir une grande surface libre, ce qui dispense de refroidir artificiellement l'une des séries de soudures. Les soudures de même rang sont d'une part du côté du centre, de l'autre à la circonférence de la couronne. Les couronnes superposées sont réunies entre elles, soit en tension par leurs pôles contraires, soit en quantité par leurs pôles semblables. Les soudures centrales forment, avec un lut à l'amiante, un cylindre (*fig.* 103) dans l'intérieur duquel s'élève un tuyau en terre réfractaire A amenant le gaz de l'éclairage. Ce tuyau est percé de petits trous *n* qui donnent issue au gaz, de sorte qu'on peut enflammer les jets sortant au milieu d'un courant d'air et chauffer fortement les soudures centrales. La pile est formée de plusieurs assises analogues B, B que l'on réunit à

Digitized by Google

volonté en quantité ou en tension et qui sont isolées l'une de l'autre par des rondelles d'amiante *r*. Quant aux soudures extérieures, elles sont simplement maintenues froides par le

Fig. 103.



rayonnement et le contact de l'air extérieur, et le refroidissement est favorisé par la forme particulière des lames de fer.

L'alliage de zinc et d'antimoine donne la plus grande force électro-motrice possible quand les deux métaux sont alliés à équivalents chimiques égaux. M. Clamond a reconnu, toutefois, qu'il y a intérêt à employer d'autres proportions et à diminuer un peu la force électro-motrice, car la résistance diminue en même temps et plus rapidement. Il faut, de plus, empêcher le refroidissement brusque qui se produit quand on coule l'alliage dans le moule et prévenir le plus possible la cristallisation. Pour cela, on chauffe le moule à une température très voisine du point de fusion de la substance thermo-électrique, et celle-ci est coulée elle-même très près de son point de solidification.

L'auteur emploie le fer comme deuxième élément, préférablement au cuivre et à l'argentan, parce que ces derniers métaux sont attaqués, dissous par l'alliage, et que les armatures qu'ils constituent sont mises rapidement hors de ser-

Digitized by Google

vice. Le fer, au contraire, résiste très bien. Grâce à ces précautions, une des piles a pu fonctionner six mois sans interruption.

Une pile, composée de 5 couronnes de 10 couples chacune et mise en activité moyennant une dépense de 170^{lit} de gaz à l'heure, déposait 20^{gr} de cuivre pendant ce même temps. Un certain nombre de ces modèles fonctionnent depuis cinq ans dans des ateliers de galvanoplastie, entre autres ceux de la maison Goupil et de l'imprimerie de la Banque.

Le débit d'électricité paraît augmenter, d'après l'auteur, proportionnellement au poids des couples, et 30 couples pesant chacun 200^{gr} équivalent à un couple de Bunsen de $0^{m},18$ de hauteur. La pile à 5 couronnes que nous avons décrite vaut donc $\frac{5}{3}$ de Bunsen.

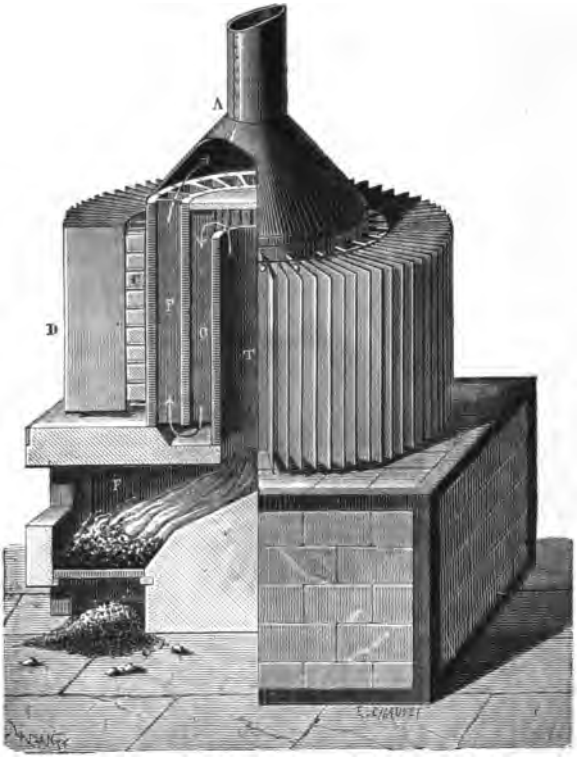
M. Clamond a construit récemment, sur le même principe, des piles contenant un grand nombre d'éléments et qui peuvent être employées pour faire de la lumière électrique [*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXVII (1879)]. La pile est montée sur un fourneau dans lequel on brûle du coke. Les gaz chauds, à la sortie du foyer F (*fig.* 104), circulent dans trois tuyaux concentriques T, O, P et s'échappent enfin dans la cheminée d'appel. Ce système, désigné sous le nom de *collecteur*, est entouré par la pile thermo-électrique C, formée d'un certain nombre de couronnes analogues à celles que nous avons décrites. Enfin, pour faciliter le refroidissement des soudures extérieures, on a fixé aux lames de fer-blanc des *diffuseurs* ou *refroidisseurs*, formés de lames minces de cuivre verticales, isolées les unes des autres. Ces lames, en raison de leur grande surface de contact avec l'air extérieur, déterminent un rayonnement considérable de la chaleur qui leur est transmise par les lames de fer, et par suite un refroidissement qui maintient une grande différence de température entre les soudures opposées.

Un premier modèle cylindrique, ayant $2^{m},50$ de hauteur sur 1^{m} de diamètre, se composait de deux piles distinctes, comprenant chacune 30 chaînes de 100 éléments ou 3000 élé-

Digitized by Google

ments; chacune de ces piles fournit un courant capable de produire un foyer de lumière électrique équivalant à 40 becs Carcel. La force électro-motrice d'une des piles est de 109^{volts} (environ 60 éléments Bunsen) et sa résistance est de $15^{ohms},5$.

Fig. 104.



L'ensemble des deux piles équivaut donc à 121 éléments Bunsen fraîchement montés, et la dépense totale de coke est de 10^{kg} à l'heure.

Un deuxième modèle carré, beaucoup moins volumineux ($1^{m},50$ de hauteur sur $0^{m},80$ de côté), comprenait quatre piles distinctes, donnant chacune un courant capable de produire une lumière de 15 à 20 becs de gaz, avec une dépense totale de $6^{kg},5$ de coke à l'heure pour les quatre piles.

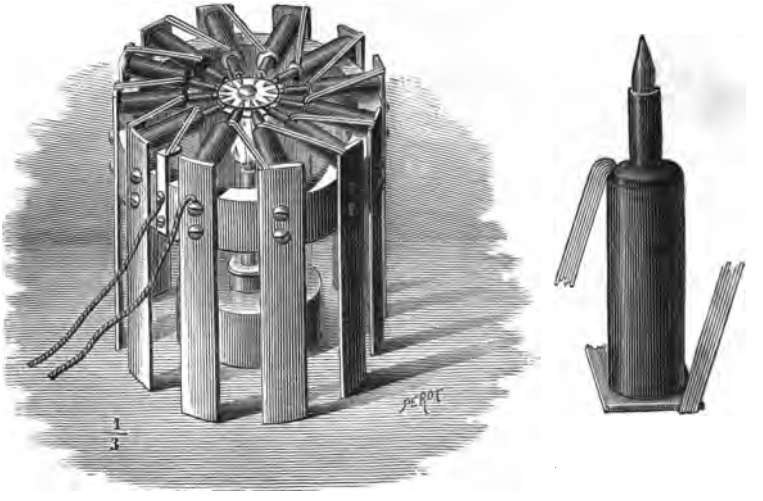
Digitized by Google

Ces résultats sont très remarquables et montrent d'une manière évidente que les piles thermo-électriques peuvent déjà rivaliser avec les piles à liquides.

Pour terminer l'énumération des piles thermo-électriques, il nous reste à citer la pile de Noé, qui a figuré à l'Exposition universelle de 1878 (Section autrichienne). Cette pile [*Journal de Physique*, t. VIII (1879)] est composée de maillechort et d'un alliage à base d'antimoine, comme la pile Marcus. La soudure chaude n'est pas chauffée directement; elle est renfermée dans une capsule de laiton, du centre de laquelle se projette une tige de cuivre rouge terminée en cône et qui reçoit la chaleur de la flamme de gaz dans laquelle elle est plongée.

Pour construire un élément (*fig.* 105), on met au fond d'un

Fig. 105.



moule convenable la capsule de laiton, dans laquelle pénètrent au centre la goupille de cuivre rouge et latéralement quatre fils de maillechort. On verse l'alliage dans le moule, ce qui établit directement le contact sans soudure étrangère entre le maillechort et l'alliage.

Digitized by Google

La soudure froide est faite à l'étain, et, pour faciliter le refroidissement, on y soude encore, comme dans la pile Clamond, une ou plusieurs feuilles minces de cuivre ou de laiton (*fig.* 105), qui présentent une grande surface et peuvent être maintenues froides, soit simplement par l'air ambiant, soit par un bain d'eau.

Dans les petits modèles, comme celui que représente la figure, les couples sont disposés en cercle, et la flamme placée en dessous échauffe en même temps toutes les soudures centrales. Dans les modèles plus grands, les éléments sont disposés en deux lignes parallèles qui se regardent, de sorte que les soudures de même rang des deux séries puissent être chauffées en même temps par une même rampe à gaz.

Ces éléments ont une force électro-motrice égale à $\frac{1}{16}$ de daniell pour une température de la soudure chaude telle que les goupilles de cuivre ne soient même pas portées au rouge. La résistance, avec le modèle ordinaire, est de $0^{ohm},026$ par élément.

Une pile de 20 éléments décompose l'eau; avec 40 on peut charger une pile secondaire ou faire agir une bobine d'induction. Un appareil composé de deux piles de 20 éléments chacune, chauffées par deux becs Bunsen, permet d'effectuer de petites opérations de dorure, argenture ou nickelage et est effectivement employé à ces usages, en Autriche, par les horlogers et les bijoutiers.

Comme on le voit, cette pile, à peu près identique à la pile Marcus comme éléments, se rapproche beaucoup par sa forme de la pile Clamond. L'inventeur assure qu'elle ne s'altère pas avec le temps, ce qui serait en contradiction avec les résultats énoncés par M. Clamond. Nous avons dit, en effet, que ce dernier avait renoncé à employer le maillechort, qui est attaqué par l'alliage à base d'antimoine, et avait été forcé de recourir au fer-blanc. Ce point mériterait donc d'être éclairci si l'on voulait essayer industriellement la pile de Noé.

Digitized by Google

CHAPITRE SEPTIÈME.

RÉSUMÉ.

TABLEAUX DES FORCES ÉLECTRO-MOTRICES.

Pour terminer, nous croyons utile de rappeler dans les Tableaux suivants la force électro-motrice d'un certain nombre de piles.

Nous ne pouvons donner aucun nombre relatif aux résistances : on sait, en effet, que cette quantité varie entre des limites extrêmement étendues suivant les dimensions de la pile, sa forme et le degré de concentration des liquides. On trouvera du reste, dans les Tableaux des pages 22 et 23, les résistances spécifiques des substances employées le plus communément dans les piles.

TABLEAU I.

Force électro-motrice de quelques éléments à un seul liquide (d'après Poggendorff et Edm. Becquerel).

1° *Avant la polarisation.*

			volts
Argent,	eau acidulée sulfurique,	zinc ordinaire	1,03
Cuivre,	»	»	0,81
Platine,	»	zinc amalgamé	1,44
Argent,	»	»	1,24
Cuivre,	»	»	0,94

2° *Après la polarisation.*

Platine,	eau acidulée sulfurique,	zinc amalgamé	0,65
Argent,	»	»	0,52
Cuivre,	»	»	0,44

Digitized by Google

TABLEAU II.

Force électro-motrice de quelques éléments à deux liquides (d'après Joule).

	+	—	volts
A	Platine, acide azotique;	amalg. de zinc, acide sulfurique étendu.	1,83
	» »	fer, »	1,37
	» »	cuivre, »	0,89
	» »	argent, »	0,52
	» »	platine, »	0,36
B	Platine, acide azotique;	amalg. de zinc, solut. de sulf. de soude.	1,83
	» »	fer, »	1,44
	» »	cuivre, »	0,90
	» »	argent, »	0,52
	» »	platine, »	0,17
C	Platine, acide azotique;	amalg. de zinc, solution de sel marin.	1,94
	» »	fer, »	1,43
	» »	cuivre, »	1,13
	» »	argent, »	0,93
	» »	platine, »	0,54
D	Platine, acide azotique;	amalg. de zinc, solution de potasse...	2,29
	» »	fer, »	1,65
	» »	cuivre, »	1,17
	» »	argent, »	0,45
	» »	platine, »	0,30
	» »	amalgame de potassium, »	2,95
	Platine, bioxyde de plomb et ac. sulfur.;	amalg. de zinc, solution de potasse...	2,71
	» »	fer, »	1,73
E	Cuivre, solut. de sulf. de cuivre;	amalg. de zinc, solut. de sulf. de soude.	1,02
	» »	fer, »	0,58
	» »	cuivre, »	0,08

Digitized by Google

	+		—		volts
F	Cuivre,	solut. de sulf. de cuivre;	amalg. de zinc,	acide sulfurique étendu.	0,98
	»	»	fer,	»	0,48
	»	»	cuivre,	»	0,04
G	Cuivre,	solut. de sulf. de cuivre;	amalg. de zinc,	solution de sel marin.	1,04
	»	»	fer,	»	0,54
	»	»	cuivre,	»	0,27
	Cuivre,	solut. de sulf. de cuivre;	fer,	solution de potasse ...	0,66
	»	»	cuivre,	»	0,52

Si l'on compare dans ce Tableau les groupes d'éléments qui ne diffèrent que par le métal négatif, on trouve certaines relations qu'on a essayé d'ériger en lois, mais ces relations ne paraissent pas générales. Ainsi, quand on remplace l'amalgame de zinc successivement par le fer, le cuivre, l'argent et le platine, on voit décroître la force électro-motrice. L'ordre est conservé dans chaque série; mais les différences ne restent pas constantes, de sorte que la substitution d'un métal négatif à un autre change la force électro-motrice de quantités qui dépendent aussi de la nature des liquides.

TABLEAU III.

Force électro-motrice de divers éléments à deux liquides (d'après J. Regnauld).

				volts
Cuivre,	sulfate de cuivre;	zinc pur,	sulfate de zinc...	0,96
»	azotate de cuivre;	»	azotate de zinc...	0,87
»	chlorure de cuivre;	»	chlorure de zinc.	0,96
»	sulfate de cuivre;	zinc amalg.,	acide sulfurique..	0,98
Nickel,	sulfate de nickel;	zinc pur,	sulfate de zinc...	0,69
»	chlorure de nickel;	»	chlorure de zinc.	0,60
»	azotate de nickel;	»	azotate de zinc...	0,72
Cobalt,	chlorure de cobalt;	zinc pur,	chlorure de zinc.	0,62
»	azotate de cobalt;	»	azotate de zinc...	0,51

Digitized by Google

				volts
Cadmium,	sulfate de cadmium;	zinc pur,	sulfate de zinc...	0,30
»	chlorure de cadmium;	»	chlorure de zinc..	0,23
»	bromure de cadmium;	»	bromure de zinc..	0,23
»	iodure de cadmium;	»	iodure de zinc...	0,25
»	azotate de cadmium;	»	azotate de zinc...	0,23
»	sulfate de cadmium;	zinc amalg.,	sulfate de zinc...	0,32
»	»	»	acide sulfurique, $SO^3 + 5HO$.	0,32

Il résulte de ce Tableau que, si l'on constitue une pile avec deux métaux plongeant chacun dans la dissolution d'un de leurs sels, et que ces sels soient de même acide, la force électro-motrice varie peu avec la nature de cet acide.

Nous donnons enfin dans le Tableau suivant la force électromotrice des principales piles dont il a été question dans cet Ouvrage, en suivant l'ordre même dans lequel elles ont été décrites.

TABLEAU IV.

Forces électro-motrices des principales piles.

1° *Piles à un seul liquide.*

Pages.		volts
91.	Pile de Volta (zinc-cuivre)	0,85
125.	» de Walker (charbon platiné)	0,66
134.	» de Becquerel (sulfate de plomb et eau salée)	0,54
»	» (sulfate de plomb, eau acidulée)	0,49
137.	» de Warren de la Rue (chlorure d'argent)	1,03
144.	» de Leclanché (bioxyde de manganèse)	1,48
153.	» de Poggendorff (bichromate de potasse) sans diaphragme.	1,80

2° *Piles à deux liquides.*

169.	Pile de Daniell (sulfate de zinc et zinc amalgamé)	0,96
»	» (eau acidulée au treizième et zinc amalgamé).	0,98
»	» (eau acidulée au cinquième et zinc amalgamé).	1,08
»	» (eau salée et zinc amalgamé)	1,06
»	» (azotate de cuivre)	1,00
203.	» de Reynier (sulfate de cuivre, soude caustique)	1,35

Digitized by Google

Pages.		volts
208.	Pile de Grove (acide nitrique fumant, eau acidulée au cinquième)	1,96
»	de Grove (acide nitrique, densité 1,33, eau salée)	1,90
215.	» de Bunsen (acide nitrique fumant, eau acidulée au cinquième)	1,96
»	de Bunsen (acide nitrique, densité 1,38)	1,89
241.	» de Marié-Davy (sulfate de mercure, eau acidulée au douzième)	1,52
»	de Marié-Davy (sulf. de mercure, eau acidulée étendue)	1,33
245.	» de Latimer-Clark (sulfate de zinc, sulfate de mercure)	1,46
251.	» de Poggendorff (bichromate de potasse et vase poreux)	2,03
252.	» de Cloris Baudet (bichrom. de potasse et vase poreux)	2,00
254.	» de Niaudet-Breguet (chlorure de chaux)	1,60
265.	» secondaire Planté	2,80

3° *Piles thermo-électriques.*

277.	Pile thermo-électrique de Bunsen	0,110
280.	» de Marcus	0,004
283.	» de Becquerel (0° - 800°)	0,380
291.	» de Clamond	0,036

FIN.

Digitized by Google

Digitized by Google

ADDITIONS.

Nous donnons ici en Additions quelques nouvelles dispositions de piles électriques qui ont paru postérieurement à l'impression des parties correspondantes de cet Ouvrage.

SUPPLÉMENT A LA PAGE 189. — M. d'Arsonval [*la Lumière électrique*, p. 352 (1880)] propose de remplacer le sable de la pile Minotto par du noir animal lavé et en poudre. Cette substance a l'avantage de retenir le sulfate de cuivre, ce qui empêche absolument les dépôts de cuivre de se former sur le zinc. La pile est ainsi plus constante et l'usure devient nulle quand le circuit est ouvert; mais la résistance de l'élément est augmentée.

SUPPLÉMENT A LA PAGE 247. — On obtient de bons effets, dans les piles à deux liquides, en employant autour de l'électrode positive une dissolution qui donne avec le second liquide un précipité conducteur et électrolysable. Dans ces piles, imaginées par M. d'Arsonval [*la Lumière électrique*, p. 352 (1880)], les pores du diaphragme sont ainsi bouchés par le précipité électrolysable tant que le circuit est fermé, ce qui prévient le mélange des deux liquides. La pile zinc-chlorure de zinc, argent-nitrate d'argent, construite dans ces données, possède une force électro-motrice de $1^{volt},5$; mais elle est dispendieuse. On pourrait employer de même le couple zinc-sulfate de zinc, plomb-nitrate de plomb; mais la force électro-motrice serait seulement de $0^{volt},7$ environ.

Digitized by Google

SUPPLÉMENT A LA PAGE 253. — M. P. Germain [*la Lumière électrique*, p. 78 (1881)] propose d'employer comme liquide dépolarisant dans la pile à deux liquides un mélange de chromate de potasse, de chlorhydrate d'ammoniaque et d'acide sulfurique. Reprenant une disposition imaginée par Liais et Fleury (p. 220), il supprime le diaphragme ordinaire et le remplace par un cylindre poreux de charbon. La pile est alors constituée de la manière suivante.

Au fond d'un vase de verre est une rainure circulaire dans laquelle repose un cylindre creux de charbon poreux, recouvert dans sa partie inférieure de vernis Chrétien (inattaquable aux acides); un serre-lame est disposé sur ce charbon pour le pôle positif. Dans l'intervalle annulaire compris entre le vase et le charbon, on verse une dissolution composée de :

Acide sulfurique.....	150gr
Chromate de potasse.....	120
Chlorhydrate d'ammoniaque....	30

Dans le cylindre de charbon, on met une lame de zinc, quelques gouttes de mercure pour maintenir l'amalgamation et une dissolution au dixième d'acide chlorhydrique. Le zinc est relevé en temps ordinaire comme dans la pile à bouteille, et il ne plonge dans l'acide qu'au moment où l'on veut utiliser le courant.

En adoptant le chromate au lieu du bichromate de potasse que l'on emploie d'ordinaire, l'auteur a pensé favoriser la production, dans le vase extérieur, d'un peu d'eau oxygénée qui augmenterait, d'après lui, la quantité d'électricité fournie par la pile dans un temps donné. Enfin, comme le chromate de potasse et l'acide sulfurique sont en excès dans le vase extérieur, la pile se trouve montée en réserve, comme la pile Cloris Baudet, et peut fonctionner longtemps sans qu'on ait à renouveler les liquides.

Digitized by Google

INDEX ALPHABÉTIQUE

DES

NOMS D'AUTEURS CITÉS DANS CET OUVRAGE.

A.

Alix, 233.
Almeida (d'), 228.
Archereau, 215, 220.
Arrott, 259.
Arsonval (d'), 301.

B.

Bagration, 112.
Balsamo, 233.
Barclay, 260.
Becquerel père, 133, 167, 258, 262.
Becquerel (Edm.), 134, 274, 283.
Behrens, 270.
Bergon, 242.
Bertelli, 179.
Berzélius, 101.
Blanc-Filipo, 114.
Bœttger, 119, 121, 235.
Boulay, 198.
Bourseul, 174.
Breguet, 118, 172.
Breton, 107.
Brett, 112.
Buff, 182, 239.
Bultinck, 131.
Bunsen, 214, 236, 277.
Byrne, 160.

C.

Calla, 188.
Callan, 121, 213.
Callaud, 193.
Camacho, 252.
Candido, 181.
Carré, 178.
Caussinus, 257.
Cazin, 19.
Chevreusse, 214.
Children, 97.
Chutaux, 160.
Clamond, 289.
Clarke, 152.
Cloris Baudet, 252.
Cooke, 112.
Cooper, 214.
Crahay, 95.
Cruikshank, 95.
Csapo, 226.

D.

Daguin, 225.
Daniell, 169.
Dehérain, 111.
De la Rive, 136, 144, 211.
Delaurier, 154, 162, 164, 199, 250.
Deleuil, 215, 216.

Digitized by Google

Deluc, 270.
Demance, 109.
Dering, 237.
Deroy, 213.
Desbordeaux, 111.
Devos, 118.
Doat, 255.
Duboscq, 218.
Duchemin, 240, 247, 249.

E.

Ebner (d'), 127.
Eccher, 248, 262.
Eisenlohr, 200.

F.

Fabre de Lagrange, 117.
Faraday, 40, 105.
Faure, 223.
Fechner, 111.
Figuier, 164.
Fleeming Jenkin, 78.
Fleury, 221.
Fonvielle (de), 111.
Fortin, 118, 184.
Fuller, 251.
Fyfe, 110.

G.

Gaiffe, 143, 150.
Gassiott, 96.
Gaugain, 129, 274.
Gauss, 68.
Gay-Lussac, 95.
Gérardin, 240.
Germain, 302.
Goodmann, 130.
Grave, 124.
Grenet, 153, 243.
Grove, 173, 208, 268.
Grüel, 209.
Guérin, 248.
Guignet, 237.

H.

Halske, 183.
Hare, 98.
Hawkins, 234.
Helm, 117.
Henry, 233.
Héraud, 165.
Howell, 239.
Hulot, 131.

I, J.

Jablochkoff, 258.
Jacobini, 189.
Jedlick, 225.
Joule, 40.

K.

Kemp, 108, 111.
Kirchhoff, 55.
Kohlrausch, 75.
Krüger, 192.
Kukla, 235.

L.

Latimer-Clark, 83, 245.
Le Blanc, 111, 237, 249.
Leclanché, 144.
Leeson, 236.
Le Goarant de Tromelin, 251.
Lequesne, 37.
Le Roux, 238.
Leuchtenberg (de), 117.
Liais, 220.
Little, 112.

M.

Magrini, 220.
Maiche, 231.
Maistre, 127.
Marçais, 225.
Marcus, 279.
Marié-Davy, 135, 241.
Mascart, 65.
Matteucci, 115, 260.
Matthiessen, 22.
Meidinger, 191.
Melloni, 275.
Menna-Apparicio (de), 241.
Miergues, 223.
Minotto, 186.
Mœnig, 112.

Digitized by Google

Mœvig, 143.
Moleyns (de), 212.
Moncel (Th. du), 221, 224.
Morren, 275.
Morse, 210.
Moser, 199.
Mouton, 253.
Muirhead, 152, 176.
Muller, 137.
Munch, 103.
Münnich, 120.
Mure, 289.

N.

Napoléon (Louis-), 259.
Ney, 200.
Niaudet-Breguet, 254.
Noé, 293.
Normann, 197.

O.

Œrstedt, 102, 103.
Offershaus, 98.
Olfers, 234.
Omeganck, 221.

P.

Page, 123.
Palagi, 119.
Parelle, 172.
Paterson, 124.
Péclet, 170.
Pepys, 98.
Philipps de Saint-Austell, 124.
Pincus, 142.
Planté, 264.
Plush, 198.
Poggendorff, 51, 120, 123, 153, 210, 213.
Pouillet, 100, 272.
Pulvermacher, 107.

R.

Regnauld, 256.
Reinsch, 220, 249.
Remak, 197.
Renoux, 240.
Reynier, 203.
Ritter, 262.
Roberts, 130.
Roudel, 113.
Roullion, 248.
Rousse, 230.
Ryhiner, 173.

S.

Salleron, 240.
Savary, 249.
Schmidt, 102.
Schönbein, 235.
Secchi, 180, 190.
Seebeck, 272.
Selmi, 113.
Siemens, 183.
Silliman, 214.
Sinsteden, 151.
Slater, 253.
Smée, 123.
Spencer, 173.
Stefan, 281.
Stöhrer, 117.
Sturgeon, 109, 120.
Swan, 122.

T.

Tabarié, 237.
Thenard, 95.
Thomas, 221.
Thomson, 65, 201, 257.
Torreggiani, 119.
Trouvé, 155, 195.
Tyer, 126, 152.

V.

Van den Eynde, 244.
Van Melsen, 106.
Vergnes, 241.
Vérité, 172, 196.
Volta, 91, 93, 262.

W.

Wach, 168.
Walker, 118, 123, 124.
Warren de la Rue, 110, 137.

Digitized by Google

Warrington, 236.
Wartmann, 200.
Watkins, 128, 275.
Weare, 113, 199.
Weber, 68, 69, 75, 259.
Wheatstone, 130.
Wilkinson, 97.
Wilson, 238.
Wœhler, 259.
Wollaston, 100.

Y.

Young, 106.

Z.

Zaliwski-Mikorski, 119, 221.
Zamboni, 271.

FIN DE L'INDEX ALPHABÉTIQUE.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

PRÉFACE v

INTRODUCTION.

I. — Préliminaires 1
II. — Intensité d'un courant 3
III. — Résistance 20
IV. — Force électro-motrice 23
V. — Association des éléments d'une pile 26
VI. — Lois générales relatives aux effets des courants électriques 40
VII. — Application des lois précédentes à divers problèmes 45
VIII. — Détermination des constantes d'une pile 51
IX. — Diverses unités proposées pour la mesure des courants 62
X. — Règles de conversion 74
XI. — Unités de l'Association britannique 78

DESCRIPTION DES PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE PREMIER.

PREMIÈRE CLASSE. — PILES A UN SEUL LIQUIDE.

PREMIÈRE SECTION. — PILES AVEC POLARISATION.

I. — Pile de Volta 91
Type de Volta 93
Pile à auges 95
Pile à auges séparées 96
Piles en hélice 97
Piles de Children, d'Offershaus, de Pepys, de Hare.

Digitized by Google

Pages.

Pile de Wollaston..... 100

Piles de Wollaston, d'Œrstedt, de Schmidt.

Pile de Munch..... 103

Piles de Munch, de Faraday, de Van Melsen, de Young, de Breton, de Pulvermacher.

II. — Améliorations de la pile de Volta..... 108

Emploi du zinc amalgamé..... 108

Méthodes de Kemp, de Sturgeon, de Demance.

Modifications du liquide excitateur..... 110

Piles de Warren de la Rue, de Fyfe, de Desbordeaux, de Fonvielle et Dehérain, de Le Blanc, de Kemp, de Fechner, de Bagration, de Cooke, de Brett et Little, de Mœnig, de Weare, de Roudel, de Selmi, de Blanc Filipo.

III. — Piles à charbon positif..... 116

Piles de Leuchtenberg, de Stöhrer, de Helm, de Fabre de Lagrange, de Walker, de Breguet, de Fortin, de Devos, de Torregiani, de Bœttger, de Zaliwski-Mikorski, de Palagi.

IV. — Piles à fer positif..... 120

Piles de Sturgeon, de Münnich, de Bœttger, de Callan.

V. — Piles à lame positive déshydrogénée..... 122

Piles de Poggendorff, de Page, de Walker, de Smée, de Philipps de Saint-Austell, de Paterson, de C.-V. Walker, de Tyer, du baron d'Ebner, de Maistre.

VI. — Piles à un seul métal..... 128

Piles de Watkins, de Gaugain.

VII. — Piles diverses..... 130

Piles de Goodmann, de Roberts, de Hulot, de Bultinck.

CHAPITRE DEUXIÈME.

PREMIÈRE CLASSE. — PILES A UN SEUL LIQUIDE.

SECONDE SECTION. — PILES SANS POLARISATION.

I. — Piles à substance dépolarisante solide..... 133

Piles de Becquerel, de Marié-Davy, de de la Rive, de Warren de la Rue et H. Muller, de Pincus, de Gaiffe, de Leclanché, de Gaiffe, de Sinsteden, de Tyer, de Clarke et Muirhead.

II. — Piles à substance dépolarisante liquide..... 153

Piles de Poggendorff, à bouteille, de Grenet, de Delaurier, de Trouvé, de Byrne, de Chutaux, de Delaurier, de Figuier, de Héraud.

Digitized by Google

CHAPITRE TROISIÈME.

SECONDE CLASSE. — PILES A DEUX LIQUIDES.

Pages.

Expériences de Becquerel 167

PREMIÈRE SECTION. — PILES A DEUX LIQUIDES DE COMPOSITION CHIMIQUE INVARIABLE.

I. — Type de Daniell 169
Piles de Daniell, de Péclet, de Parelle, de Vérité, de Breguet, de Spencer, de Grove, de Ryhiner, de Bourseul, de Muirhead, de Carré, de Bertelli, de Secchi, de Candido, de Buff, de Siemens et Halske, de Fortin.

II. — Pile à sable 186
Piles de Minotto, de Calla, de Jacobini, de Secchi.

III. — Piles sans diaphragme 191
Piles de Meidinger, de Kruger, de Callaud, de Trouvé, de Vérité, de Normann.

IV. — Modifications diverses 197
Piles de Remak, de Boulay, de Plush, de Moser, de Delaurier, de Weare, d'Eisenlohr, de Wartmann, de Ney, de sir W. Thomson, de Reynier.

CHAPITRE QUATRIÈME.

SECONDE CLASSE. — PILES A DEUX LIQUIDES.

SECONDE SECTION. — PILES DE COMPOSITION CHIMIQUE VARIABLE.

I. — Type de Grove : zinc, platine, acide azotique 208
Piles de Grove, de Grüel, de Poggendorff, de Morse, de de Moleyns, de Swan, de Deroy, de Callan, de Poggendorff.

II. — Type de Bunsen : zinc, charbon, acide azotique 214
Piles de Bunsen, de Deleuil, d'Archereau, de Ruhmkorff, de Reinsch, de Liais et Fleury, de Magrini, d'Omeganck, de du Moncel, de Thomas, de Zaliwski-Mikorski, de Miergues, de Faure, de du Moncel, de Daguin, de Jedlick et Csapo, d'Archereau, de d'Almeida.

III. — Piles dérivant de celle de Bunsen avec un métal négatif autre que le zinc 230
Piles de Rousse, de Maiche, d'Alix et Henry, de Balsamo.

Digitized by Google

Pages.

IV. — Piles dérivant de celle de Grove avec un métal positif autre que le platine 234
Piles de Hawkins, d'Olfers, de Schönbein, de Kukla.

V. — Piles dérivant des types Grove et Bunsen avec un liquide dépolarisant autre que l'acide azotique 235
Piles de Buff, de Le Blanc, de Guignet, de Le Roux, de Wilson, de Howell, de Buff, de Gérardin, de Duchemin, de Renoux et Salleron, de Vergnes, de Marié-Davy, de Grenet, de Menna-Apparicio, de Latimer-Clark, de Duchemin, d'Eccher, de Guérin, de Roullion, de Reinsch, de Duchemin, de Savary, de Delaurier, de Camacho, de Cloris Baudet, de Slater, de Niaudet-Breguet.

VI. — Modifications diverses 255
Piles de Doat, de Thomson, de Caussinus, à consommation de charbon (Becquerel, Jablochkoff).

VII. — Piles à un seul métal 259
Piles de Wœhler et Weber, d'Arrott, de Louis-Napoléon, de Barclay, de Matteucci.

CHAPITRE CINQUIÈME.

PILES SECONDAIRES. — PILES A GAZ. — PILES SÈCHES.

I. — Piles secondaires 262
Piles de Ritter, de Planté.

II. — Piles à gaz 268

III. — Piles sèches 270

CHAPITRE SIXIÈME.

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

Pile de Pouillet 272
» de Melloni 275
» de Morren 275
» de Bunsen 275
» de Marcus 277
» de Becquerel 283
» de Clamond 289
» de Noé 293

Digitized by Google

CHAPITRE SEPTIÈME.

RÉSUMÉ. — TABLEAUX DES FORCES ÉLECTRO-MOTRICES.

Pages.

TABLEAU I. — Force électro-motrice de quelques éléments à un seul liquide (d'après Poggendorff et Edm. Becquerel) 295

TABLEAU II. — Force électro-motrice de quelques éléments à deux liquides (d'après Joule) 296

TABLEAU III. — Force électro-motrice de divers éléments à deux liquides (d'après J. Regnauld) 294

TABLEAU IV. — Forces électro-motrices des principales piles 298

ADDITIONS 301

INDEX ALPHABÉTIQUE des noms d'auteurs cités dans cet Ouvrage 303

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, QUAI DES AUGUSTINS, 55.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

2 yo

Digitized by Google

89089716617

B89089716617A

Digitized by Google

Digitized by Google

89089716617
b89089716617a